黑洞和宇宙

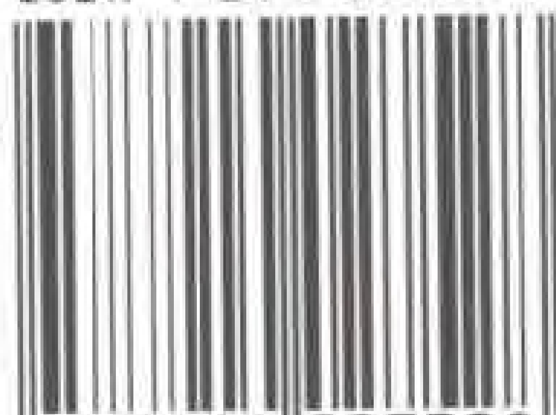
〔俄〕伊戈尔·诺维科夫 著
黄天衣 陶金河 译



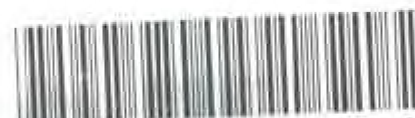
代表科普读物最高水平
的剑桥科普
是由一流的科学家撰写的。
剑桥科普不是旧的
科学知识的普及，
它始终站在科学的前沿，
普及着还不为众人所知的
最新科学知识。

装帧设计　汤慧丽

剑桥文丛



ISBN 7—214—02752—6
G·872　定价：12.00元


国防大学 2 075 9167 6

黑洞和宇宙

剑桥文丛

伊戈尔·诺维科夫 著
衣 陶金河 译

主 编 吴 源
策 划 余江涛



江苏人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

黑洞和宇宙/[俄]伊戈尔·诺维科夫著;黄天衣,陶金河译.南京:江苏人民出版社,2000.7
(剑桥文丛)
书名原文:The Black Holes And The Universe

ISBN 7-214-02752-6

Ⅰ.黑... Ⅱ.①诺...②黄...③陶... Ⅲ.①黑洞-研究②宇宙-研究 Ⅳ.P1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 25573 号

书　　名	黑洞和宇宙
著　　者	[俄] 伊戈尔·诺维科夫
译　　者	黄天衣　陶金河
特约编辑	江　枫
责任编辑	蒋卫国
责任监制	王列丹
出版发行	江苏人民出版社
地　　址	南京中央路 165 号
邮政编码	210009
经　　销	江苏省新华书店
印 刷 者	淮阴新华印刷厂
开　　本	850×1168 毫米　1/32
印　　张	6.75　插页 2
字　　数	146 千字
版　　次	2000 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
标准书号	7-214-02752-6/G·872
定　　价	12.00 元

(江苏人民版图书凡印装错误可向承印厂调换)

中文版前言

150年前伟大的俄罗斯诗人米哈依尔·莱蒙托夫(Mikhail Lermontov)写道:"前言是一本书里第一篇也是最后一篇索然无味的文字。它阐明写书的目的,说明这些目标有多么正确,还要对评论界的意见作出答复。"自那以后世界已经改变了很多,写作的方式却仍然没有变化。作者们仍然在写前言,本书的作者也不例外。莱蒙托夫抱怨说读者厌倦了前言,在风驰电掣的现代,一定更是如此。但我还是劝中国的读者不要太匆忙,在进入正文之前耐下心来读一下这篇前言。

中国是包括天文学在内的人类多种文化的摇篮。几千年前在中国进行了第一批真正的天文观测。几个世纪以来,人们观测了一些天体永恒而缓慢的绕行运动,包括这些天体系统中的周期运动,宏大的天穹似乎没有可以察觉的变化。以后的发现迫使天文学家改变他们的看法。事实表明所有的天体都有自己的历史。它们诞生、生存、死亡。整个宇宙同样如此。

没有什么比宇宙的诞生及其演化和超巨天体的死亡更为壮观。弄清为什么会这样演化同样令人心醉神迷。爱因斯坦写道:"宇宙中最无法理解的事是宇宙是可以认识的。"中国也是对恒星死亡时蔚为壮观的爆炸进行首批观测的国家之一。

像自然界的每件事物一样,人类的理性向极限挑战。毫无疑问,世界上许多人希望了解所有秘密中最为深邃的一个——宇宙的秘密和恒星死亡的秘密。

本书的目的在于满足这种需求。

中国的读者现在可以阅读这本书,这使我非常愉快。在我的科学生涯中我和中国的同行们会晤并讨论天文学,我对根基深远的中国天文学怀有深深的敬意。我为本书的中文版作了更正和增补以使本书赶上时代。如果阅读本书会使读者产生对现代天文学伟大成就的兴趣并给读者带来愉悦,我将深感欣慰。

伊戈尔·诺维科夫于哥本哈根

英文版前言

超强引力场是本书的主角。这种引力扭曲了空间和时间，在天体灾难性地塌缩时生成黑洞。这种超强的引力统治着宇宙，控制着大量物质的运动。

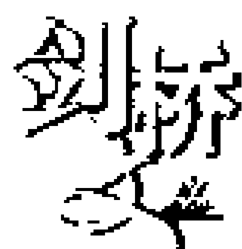
这本书讲述了超强引力造成的常被认为是奇迹的自然现象，它也解释了如何去研究和了解这些奇迹。

由剑桥大学出版社出版本书的英文版，我感到莫大的荣幸。剑桥是引力科学的摇篮。伟大的牛顿(Newton)曾在此工作，他的名字被赋予物体运动的定律。就是在剑桥，英国地质学家约翰·米歇尔(John Michell)给著名的物理学家亨利·卡文迪施(Henry Cavendish)寄了一封信，在信里他预言了存在今天被称为黑洞的最为奇特的天体。就是在剑桥，本世纪中叶发现了脉冲星。(脉冲星是恒星，质量与太阳相近，因超强的引力而被压缩到直径几十公里大小。)今天，和过去一样，剑桥仍是杰出科学家的领地。斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)、马丁·里斯(Martin Rees)和其他一些科学家在此工作，他们研究黑洞蒸发的秘密，探讨宇宙大尺度结构造成的神奇形态的起源之谜。作为一个苏联的物理学家和天体物理学家，和英国特别是剑桥的同行们的交流，永远是非常有收获的。我每次访问剑桥，总是获得了灵感和激情。

我深深地感谢剑桥大学出版社，由衷地感谢我在莫斯科的同事维塔利·基辛(Vitaly Kisin)，他把本书译成英文，使英国的读者能读到这本科学通俗著作。

伊戈尔·诺维科夫于莫斯科

剑桥文丛　第二辑



人人应知的科学
人人应知的技术
微生物的秘密世界
行星上的生命
天外智慧
黑洞和宇宙
危险的地球
生命之线——基因与遗传工程
量子物理学:幻象还是真实

目　　录

第二部 宇 宙

引　　言

这本书讲述天体物理学中的最新发现：关于黑洞和宇宙膨胀开始阶段的故事；它也陈述宇宙的未来可能是什么样子。

毫无疑问，每一个读者都听说过或读过黑洞的故事。电视和电台的节目、杂志和各类书籍都频频提到黑洞，不仅是科学教科书和幻想小说，甚至还有儿童读物。黑洞为什么会如此著名呢？

因为黑洞是有非常奇特性质的天体。

> 在人类大脑所有的概念中，包括氢弹、独角兽、教堂屋檐上承漏雨水的怪兽，最为奇特的可能就是黑洞。它有确定的边界，任何东西都会掉进去却没有东西能逃出来。它有极强的引力场，以至于光线也在它的掌握之中。它扭曲了空间和时间。像那些奇形怪兽一样，黑洞似乎更适合安居在科学幻想或古老神话之中，而不是现实的宇宙。然而，现代物理定律确实预言

黑洞的存在。银河系里就可能有几百万个黑洞。

美国物理学家克普·森恩(Kip Thorne)描述了黑洞以上的性质。

还应当说明黑洞内部空间和时间的性质以一种十分奇妙的方式发生了畸变。时间和空间相互缠绕着进人一个通道，深处有一个边界，边界以内的时间和空间完全量子化了。黑洞隐藏在深处，一旦进人了它的边缘，那就是引力的深渊和无法逃脱的世界，那里发生着奇异的物理过程并呈现着新的自然定律。

黑洞是宇宙中最巨大的能源。我们观测到的遥远的类星体和爆炸中的星系核看来就是黑洞在展现自己。黑洞在大质量恒星的死亡中诞生。不能排除有朝一日人类会利用黑洞作为能源。

自从观测到了宇宙的膨胀，研究"大爆炸"的天体物理学家们作出了蔚为壮观的发现。膨胀从什么时候开始？根据是什么？膨胀开始之后立即发生些什么样的事件？为什么会形成星系？宇宙是无限的吗？宇宙未来的命运是什么？这些是本书要探讨的问题。

很自然会提出一个问题：为什么我们在一本书中把黑洞和宇宙放在一起来叙述？他们有什么共同点？我们的回答可以是十分简洁的一句话。从物理的角度来看，共同点是他们都有超强的引力场。现在黑洞和宇宙都处于相对论天体物理的研究框架内。相对论天体物理是天体物理学的一个分支，研究引力场非常之强从而能把天体加速到近于光速的情况，

而光速是自然界允许的最大速度。其他物体的引力场都到不了这么强的程度。黑洞和宇宙还有另一个共同的特征：神秘、令人困惑和不寻常。它们的性质不仅与我们周围日常事物的性质十分不同，而且也与许多不常见而特殊的物体和天体的性质迥异。

一个谜越是神秘，一个问题越是深邃，专家和爱好者的兴趣就越是强烈。阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)，这位广义相对论的创造者写道："一个人最完美和最强烈的情感来自面对不解之谜。"在宇宙中，就神秘性而言，黑洞是不会有对手的了。

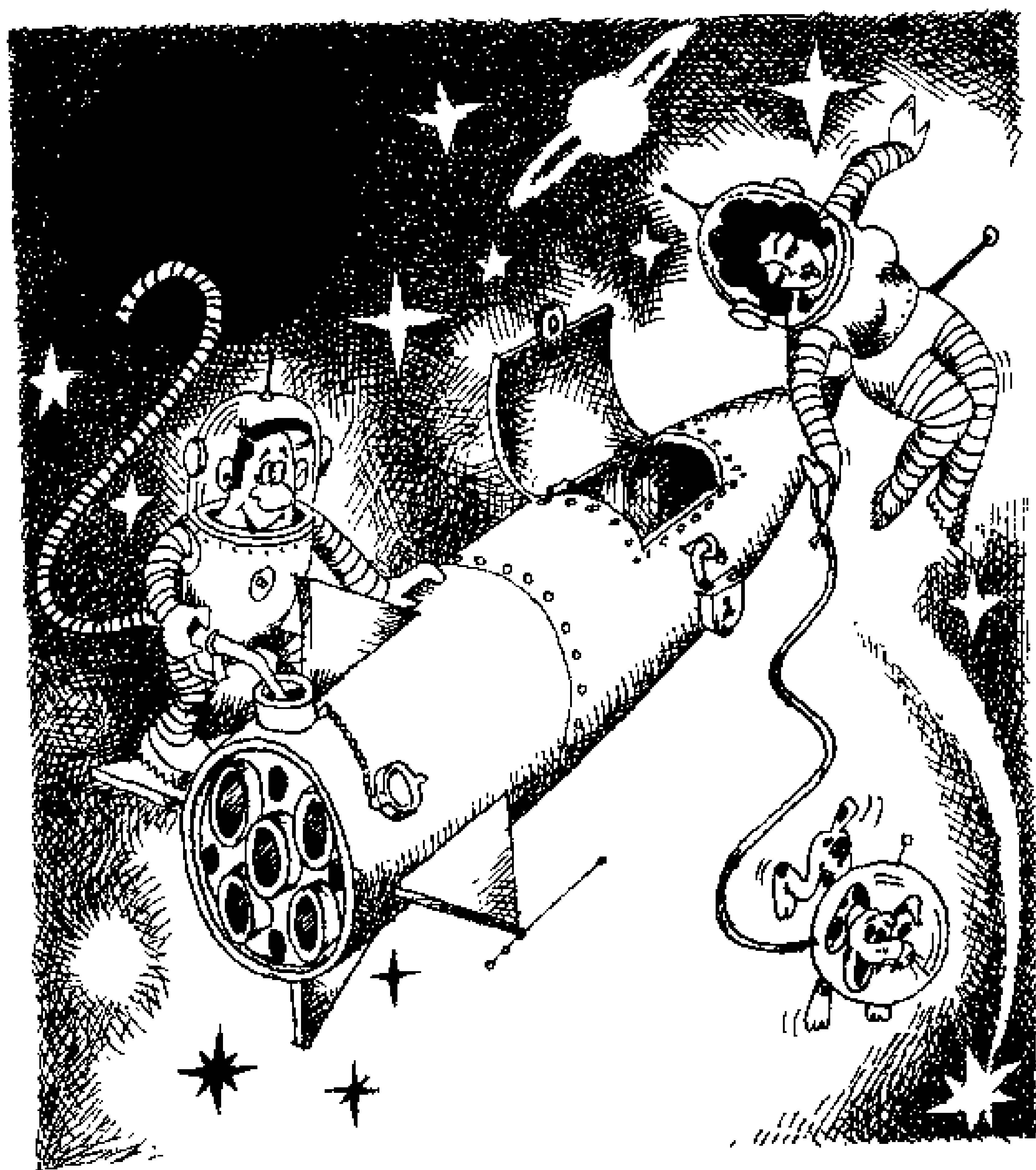
最后，我们还要指出另一个因素，一个重要的因素，它造就了一个联合起来的故事。众所周知，宇宙在膨胀着。在十分遥远的过去，宇宙中的物质密度非常地高，粒子的能量及其相互作用力是不可思议地大。在那种条件下，自然的规律很不平常，空间和时间的性质也有巨大的变化。这种状态是奇异的，称之为"奇点"。在另一方面，黑洞内部不可避免地要生成一个奇点。因此，黑洞有时被看做是一个实验室，在微小的尺度上模拟宇宙的过去。所以通常是同一批科学家既研究黑洞也研究宇宙的演化(本书的作者是其中之一)，这就毫不奇怪了。

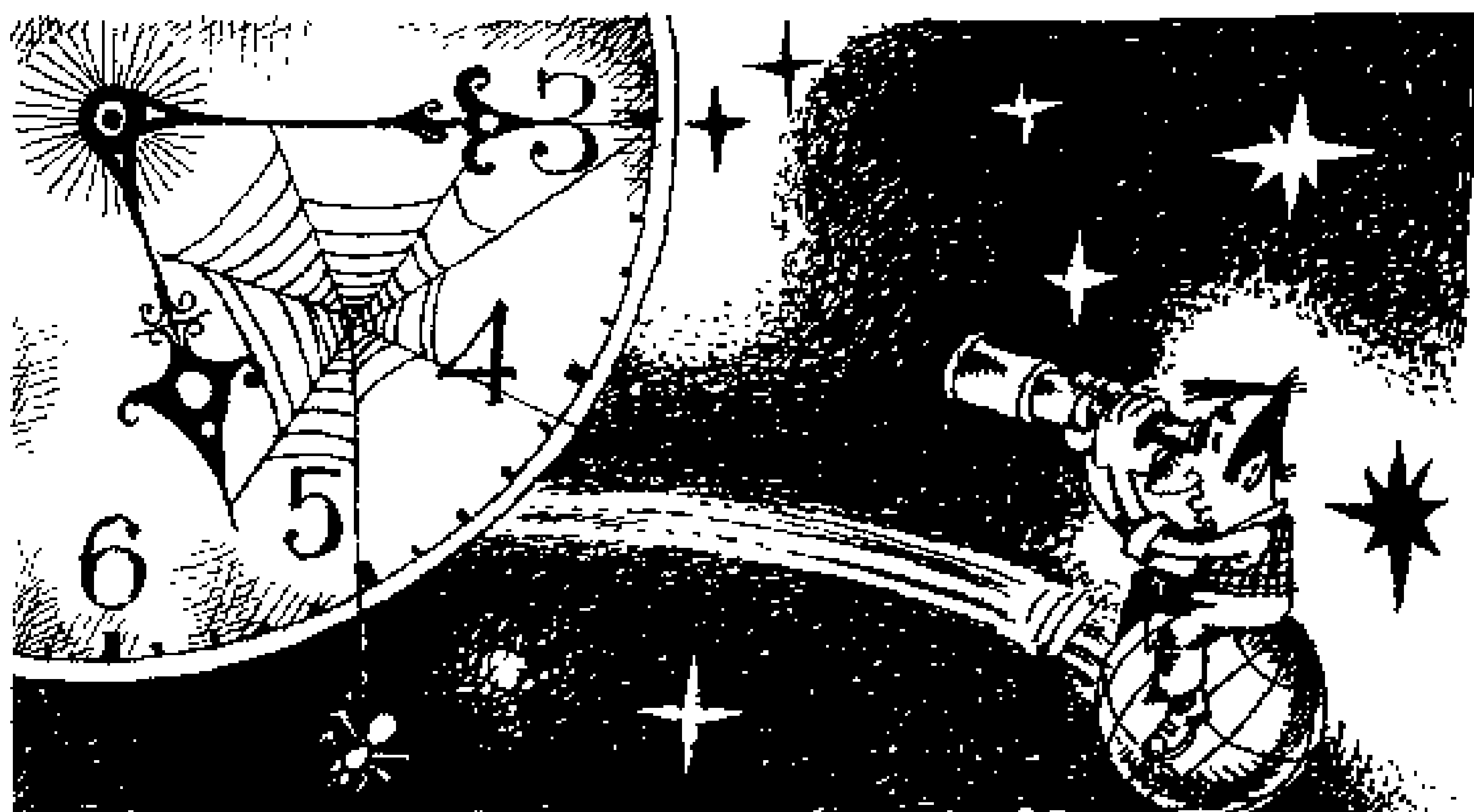
13世纪末，人们有一句格言："能用一种解释时，不要用两种。"然而，我们用了几种理由来说明这本书应当把这些看来不相同的问题放到一起来加以阐述。

这本书是写给那些热爱科学之谜的人的。它描述黑洞和宇宙的许多特性，讲述问题如何得到了解决而新的问题又如何产生。我没有试图对所有的细节做出详细的描述，那样做

既没有意义，对这种类型的书而言也不现实。基于同样的理由，我只是偶尔才提到日期和人名，主要来自我个人的印象和回忆。我宁愿用不很连贯的笔触，描绘出一幅天体物理学家们解决(或仅仅是处理)这一宏伟课题的图像。

第一部　黑　　洞





1. 什么是黑洞

看不见的星

黑洞是由引力产生的。因此,合乎逻辑地说,发现黑洞始于依撒克·牛顿(Isaac Newton)时代,正是牛顿发现了万有引力定律,这个定律表述作用于所有物体上的力。所有其他类型的物理相互作用都与物质的具体性质有关。例如,电场只作用于带电物体上,中性体完全不受影响。引力是自然界惟一的统驭万物的相互作用,它(在初始条件相同的情况下以精确相同的方式)作用于一切物体之上：小质量的和大质量的粒子,甚至光。牛顿假定光也受到大质量物体的吸引。正是这种光也受到引力作用的思想开始了黑洞及其令人惊讶性质的历史。

著名的法国数学家和天文学家、科学史上的杰出人物皮埃尔·拉普拉斯(Pierre Laplace)是最早预言黑洞的科学家之一。他是庞大的五卷本《天体力学》的作者。这部著作完成并出版于1798年至1825年间,它严格地建立在万有引力定律的基础之上,提出了太阳系天体的经典运动理论。在此之前,一些人观测到行星运动中的奇怪现象,月球和太阳系中的其他天体难以为人们所完全理解,甚至似乎与牛顿定律相冲突。拉普拉斯通过精确的数学分析证明,所有这些细微之处是由于天体之间的相互吸引和行星对其他行星运动的引力效应所引起的。拉普拉斯在《天体力学》前言中指出,天文学包含着力学中极其重要的问题。此外,他是第一个提出"天体力学"这个术语的人,这个术语在今天的科学语言中已经根深蒂固了。

拉普拉斯也是最早一位认识到有必要用演化的方法去解释天体系统性质的人。他在康德(Kant)之后提出了太阳系由原始的稀薄物质形成的假设。

拉普拉斯关于太阳和行星由气体星云形成的假设仍然构成当前已发展起来的太阳系起源理论的基础。

在文献和教科书中大量地描述了许多这方面的成就以及拉普拉斯对拿破仑关于《天体力学》中没有上帝这个问题的自豪的回答:"我不需要这个假设。"

拉普拉斯曾预言看不见星体的存在,这一点现在仍鲜为人知。

这个预言是在他于1795年出版的专著《世界体系阐释》中提出的。在这本今天看来是"通俗读物"的书中,这位著名数学家没有使用公式和图画。拉普拉斯确信引力以作用于其

他物体的相同方式对光产生影响，由此得出以下惊人的结论：

> 一个与地球有同样密度的发光星体，直径比太阳大250倍，由于它的吸引，它所发出的任何光线都不可能到达我们这里。由于这一原因，宇宙中最大的发光体可能是看不见的。

书中没有给出这个命题的证明，它是几年后发表的。

拉普拉斯是如何推理的呢？采用牛顿引力理论，他计算了我们今天所说的逃逸速度，就是任意物体摆脱恒星或行星的吸引而永远飞向太空所必须具有的速度。如果物体的初速度小于逃逸速度，引力将使它的运动减速，它将停止运动然后向引力中心回落。在今天的航天时代，众所周知，地球表面上的逃逸速度是11公里/秒。天体的质量越大、半径越小，它表面上的逃逸速度就越大。很清楚，随着质量的增加，引力增强，离中心的距离增加则引力减弱。

月球表面上的逃逸速度等于2.4公里/秒，木星上是61公里/秒，太阳表面上是620公里/秒。所谓的中子星，它的质量与太阳质量相当，但半径只有10公里左右，它的表面上的逃逸速度达到光速的一半，即15万公里/秒。

拉普拉斯是这样论证的：考虑一个表面逃逸速度超过光速的天体，那么从这个恒星发出的光就不能克服该恒星的引力而进入太空，因此不能到达远处的观测者。即使这个恒星确实在发光，我们也根本看不到它。

如果保持天体的平均密度不变，那么它表面上的逃逸速度与它的半径(或直径)成正比。

现在可以清楚地看出拉普拉斯推出的结论：为了使引力把光束缚住，一个密度与地球相同的恒星，它的直径至少要达到太阳直径的250倍，也就是地球直径的2.7万倍。诚然，这样一个恒星表面上的逃逸速度也比地球表面上的逃逸速度大2.7万倍，约等于光速。因此，这个恒星就成为看不见的星体。

这是黑洞性质中的一个惊人的预言：黑洞囚禁光，因此它是看不见的。公正地说，拉普拉斯并不是惟一的也不是最早提出这个预言的人。最近已确认英国牧师和地质学家约翰·米歇尔(John Michell)于1783年提出了类似的建议。他是科学地震学的奠基人之一，他的论证与拉普拉斯的推理非常相似。

前些时候在法国和英国之间有过一场半玩笑半认真的(有时是认真的)争论，就是发现可能存在不可见星体的荣誉究竟应属于法国的拉普拉斯还是英国的米歇尔？1973年，英国理论物理学家斯蒂芬·霍金(Stephen Hawking)和乔治·艾利斯(George Ellis)在一本关于时空结构的数学方面的专著中引用了拉普拉斯证明存在黑洞可能性的论文，而当时专家们还不知道米歇尔的工作。1984年秋天，在土鲁斯(Toulouse)的一次会议上，英国天文学家马丁·里斯(Martin Rees)以并不地道的法语说，事实上第一个预言不可见恒星的人是英国人约翰·米歇尔，里斯展示了米歇尔1784年论文首页的图片。这个评论获得了与会者的掌声和微笑。

法英之间关于是谁在天王星摄动的基础上对海王星的坐标做出了预言的争论却与此不同，是法国人勒沃里叶(Le Verrier)，还是英国人亚当斯(Adams)？众所周知，他们俩各

自正确地计算了新行星的位置。当时勒沃里叶更幸运一些。许多发现都有这样的命运，经常是几个人同时独立地做出同样的发现。一般来说，一个发现应属于显示了对该问题有深入理解的人，但是有时候一些例外只能归因于不可捉摸的命运。

实际上米歇尔和拉普拉斯的预言还不是关于黑洞的真正预言，这是为什么呢？

因为关键在于当时的科学还不知道自然界根本不允许存在超过光速的运动，在真空中也不行。直到本世纪阿尔伯特·爱因斯坦在狭义相对论中才给出了证明。因此，对米歇尔和拉普拉斯而言这种恒星只不过是黑的（不发光），因为他们没有意识到恒星失去了任何与外部世界联系，以致我们无法了解这个恒星内部所发生的事情。换句话说，他们不知道这种恒星不仅是“黑的”，而且还是一个“洞”，任何物体可以掉进去，但是不可能逃出来。今天我们知道如果光无法从某个空间区域逃逸，那么就没有什么东西能够从那里出来。我们把这个区域称之为黑洞。

破坏米歇尔和拉普拉斯论证严格性的另一个原因是他们考虑了足以将一个下落物体加速到光速和能囚禁光的强引力场，却同时应用了牛顿引力定律。

爱因斯坦证明对这样的场牛顿引力定律已经失效，他发展了一个适用于超强和快速变化场（牛顿理论对此全无用武之地）的新理论，这个理论就是广义相对论。如果要证明黑洞存在并研究它们的性质，我们必须采用这个理论作为工具。

广义相对论是一个令人惊奇的优美理论。它是如此的深

奥和精致，以致每一个掌握它的人都不能不感到其美学上的愉悦。苏联物理学家列夫·朗道（Lev Landau）和叶甫根尼·利弗席兹（Evgeny Lifshitz）在他们的教科书《经典场论》中写道，它是“所有现存物理理论中最优美的”。德国物理学家麦克思·玻恩（Max Born）曾经说他欣赏广义相对论就像欣赏一件艺术品。苏联物理学家维塔利·金兹伯格（Vitaly Ginzburg）写道，这个理论使他经历“一种类似于凝视绘画、雕塑或建筑杰作时的那种感受”。

毫无疑问，无数关于通俗地展示爱因斯坦广义相对论的尝试造就了广义相对论优美的形象。但是坦率地说，这种印象离理解这个理论所具有的魅力距离之遥远犹如看一幅拉菲尔（Raphael）圣母像的复制品时的感觉与凝视这位绘画天才的原作时激动的情感之差别。

尽管如此，在不可能欣赏原作的情况下，你可以（也应该）开始了解所能够得到的较高品质的复制品（它们的优点确实有了很大的变化）。

为了理解黑洞令人难以置信的性质，了解一下爱因斯坦广义相对论一些推论的主要轮廓是有必要的。

引力半径

爱因斯坦的理论与牛顿的引力理论之间的差别是什么呢？让我们从最简单的情况开始。假定我们在一个球形而不旋转的行星表面上用弹簧秤测量该行星施加在某个物体上的吸引力。根据牛顿定律我们知道，这个力与行星质量和物体质量的乘积成正比，与行星半径的平方成反比。半径能够测算出来，例如通过测量赤道的长度再除以 2π。

但是爱因斯坦的引力理论对这个力说些什么呢？它预言这个力比用牛顿公式计算出的值稍大一些。稍后我们再详细阐述“稍大一些”的意义。

现在假想一下保持行星总质量不变，我们可以通过压缩渐渐减小它的半径。由于半径减小，行星表面上的引力将会增加。根据牛顿引力理论，半径收缩成二分之一，引力会增加到原来的四倍。爱因斯坦理论表明这个力将会增加得稍快一些：行星的半径越小，这种差别越大。

如果行星被压缩得小到产生超强的引力，牛顿引力理论的计算值与爱因斯坦理论的预期值之间的差异开始急剧扩大。根据前一理论，当天体被压缩成为一个（半径几乎为零的）点时，引力趋于无穷大。后一理论的结论有很大的不同：引力趋于无穷大发生在半径接近所谓的引力半径的时候。这个半径的值由天体的质量决定：质量越小引力半径也越小。实际上，即使质量非常巨大，它的引力半径也很小。对地球来说它只不过1厘米而已。太阳的引力半径也才3公里。一般而言，天体的半径远远大于它们的引力半径。例如，地球的平均半径是6 400公里，而太阳是70万公里。只要天体的实际半径远大于它们的引力半径，那么由爱因斯坦和牛顿的引力理论计算出力的差异极其微小。例如在地球表面上这种差别只有十亿分之一。

只有当这个压缩天体的半径接近引力半径、其引力场变得很强时，才可以明显察觉这种差别。如上所述，当天体的半径等于其引力半径时，实际的引力场强度变成无穷大。

在讨论这些行为有什么结果之前，先来看看爱因斯坦理论的一些其他结论。

这个理论最基本的要点就是它将时空的几何性质同引力联系而使其成为不可分割的整体。这些联系复杂而多种多样。现在挑选出两个重要的特征。

根据爱因斯坦理论,强引力场中的时间比远离引力体处(那里引力较弱)的时间走得更慢一些。读者肯定听说过时间能够以不同的速度流逝。然而这种事与日常习惯相抵触。时间怎么能够改变它的步伐呢?依照我们的直觉,时间是对所有过程都通用的某种间隔。时间就像是一条河,它的流动不受任何事物的影响。某些过程可能或快或慢,我们可以通过改变它们的外部条件来影响其速度。例如,加热能加速化学反应,冷冻可以减缓有机体的活动,但这些因素并不能改变原子中的电子运动。似乎对我们而言所有这些过程都处于绝对的时间河流之中,它的流逝好像不受任何事物的影响。我们传统的观念允许从时间之河中移去所有的过程,时间将继续流淌,就像空无一物的间隔。

事实上这些观念统治了亚里士多德和牛顿的时代,一直延续到爱因斯坦之前。亚里士多德在《物理学》中写道:"在两个相似而同时的运动中所流逝的时间是相同的。如果这两个时间间隔并不同时,它们仍然相同……因此,运动可能不同且相互无关,但前后两种情况下时间绝对相同。"

牛顿相信他在论及一个不证自明的真理,他这样写道:"绝对、真正和数学的时间本身自然而均匀地流动,与任何外部事物无关。"

对绝对时间概念不那么明显的怀疑甚至在古代也时有表述。例如公元前1世纪的卢克热提乌斯(Lucretius)在题名为《论物性》的诗中写道:

甚至度量万物的时间本身，
也并不存在；时间自身
存在于不连贯的事物，在运动之中，
在静止、安宁和平静之中，
在人类的想象之中。

正是爱因斯坦证明了时间绝对是虚构的。时间的流逝依赖于运动和引力场，后者在这里对我们尤其重要。在引力场中所有的过程——而不论它们的性质，全体都是如此——对外部观察者而言会减慢。这意味着减慢的是所有过程的共同性质：时间。

时间减缓（时间膨胀）的数量通常很小。例如当计及引力时，地球表面上钟表的计时只比太空中慢十亿分之一。

值得注意的是已经直接测量到地球引力场中这种微小的时间膨胀。恒星引力场中的类似效应也已被测量到，尽管这个效应也极其微小。在非常强的引力场中时间膨胀变得相当大，随着天体半径接近于引力半径而趋于无穷。

爱因斯坦理论的第二个重要结论描述了强引力场改变空间的几何性质。我们所熟悉的欧几里德几何变得没有用了。举例来说，三角形的内角和不等于两个直角，圆的周长也不等于 2π 乘以离中心的距离。普通几何图形的性质产生了变化，好像画在了一个曲面上。正是这个缘故我们才说有引力场的空间变成“弯曲的”。很明显，只有在强引力场中，当天体的尺度接近它的引力半径时，这种弯曲才变得可以觉察。

毫无疑问，弯曲空间图像犹如调和我们根深蒂固的直觉

观念与时间以不同的速度流逝一样地令人难以接受。

关于空间，牛顿用比论及时间更为肯定的口吻写道："绝对空间，就其本性以及与任何外在事物的关系而言，总是保持统一和不变的。"他认为空间是一个"事件"在其上展开而又对它毫无影响的无穷大的"场地"。

非欧几何的发现者，尼考拉·罗巴切夫斯基(Nikolai Lobachevsky)已经表达过这种观念：正是他的罗巴切夫斯基几何而不是欧几里德几何可以在一定的物理情形中出现。爱因斯坦的计算表明在强引力场中空间确实是弯曲的。

这个理论结论也获得了直接测量的支持。

那么，为什么接受广义相对论在时空方面的结论是如此的困难呢?

令人感到痛苦是由于人类日常的，甚至精密科学的经验，数世纪以来只涉及到这样一些情形，其中时间和空间性质的变化完全不明显从而被忽略了。我们的知识体系建立在日常经验的基础之上。因此，我们完全习惯于时间和空间绝对不变这个古老的教条。

在我们这个时代，人类渐渐知道一些不能忽略物质对时空性质影响的情形。尽管有思维中的惯性，我们还是必须习惯于这些情形。对于几十年前的那一代人来说，即使是最开放的头脑，掌握爱因斯坦理论也有困难，今天的新一代人接受广义相对论的预言则要容易得多。这里再补充关于相对论结果的一个说明。相对论的作者证明，不但时间和空间的性质可以变化，而且时间和空间结合成为一个整体：四维的时空。正是这个统一的流形经受了弯曲。很明显，在这样一个四维的超几何中构想可视图像尤为困难，在

这里对此不必多花时间。

还是回到一个球对称质量的外部引力场上来。

我们必须详细说明一个圆的半径指的是什么,例如行星赤道的半径,因为在强引力场中几何是非欧、弯曲的。在传统的几何中有两种决定半径的方法:一是作为圆周上的点离中心的距离;二是圆周周长除以 2π。作为空间弯曲的结果,在非欧几何中这两个量是不吻合的。

第二种决定引力体半径(不是圆周到中心的距离)的方法有许多优点。为了测量半径,根本不需要接近引力质量的中心。这是一个重要的优点,例如要测量地球的半径,到达地球的中心相当困难,但测量赤道的长度则并不太难。

对于地球这种情况,引力场并不强,没有必要直接测量圆周到中心的距离。欧几里德几何在很高的精度下保证有效,所以赤道的长度除以 2π 等于离中心的距离。可是对于具有强引力场的超密恒星,情况就并非如此:两种方法所决定的半径之间的差异可能会相当大。更有甚者,稍后将会看到在有些情况下引力中心原则上是不能达到的。因为这个缘故,我们总是把半径看做圆周的长度除以 2π。

上面所讨论的球对称非旋转天体的引力场通常被称为施瓦西场,以纪念这位科学家,他在爱因斯坦发表他的理论之后立即就求出了广义相对论方程在这种情况下的解。

德国天文学家卡尔·施瓦西(Karl Schwarzschild)是现代理论天体物理学的开创者之一,他对实测天体物理学和其他天文学分支也做出了重要贡献。施瓦西去世时年仅 42 岁。在普鲁士科学院纪念他的会议上,爱因斯坦就施瓦西对科学的贡献作出了如下评价:

施瓦西的理论论文最令人印象深刻的特点是对数学分析工具的完美掌握并轻松地用来揭示天文或物理问题的核心。这种深奥的数学知识和常识与施瓦西推理的机动灵活性相结合是一种非常罕有的天赋。正是这种天赋使得施瓦西在数学障碍吓退了其他理论家的领域中开展了重要的理论工作。与其说是他的无穷创造性努力的激励,不如说是一个艺术家发现在数学概念之间存在微妙的相互联系之网的喜悦促使他去理解隐藏着的自然规律。

施瓦西于1915年12月获得了爱因斯坦方程在球形天体引力场情况下的解。我们已经提到过以十分新奇、革命性的概念为基础的爱因斯坦理论是一个十分复杂的理论,而且在技术上也具有极端的复杂性。引力定律的牛顿公式以其经典的简洁易懂而著称,与其相比,这个新理论要求通过求解一个含十个方程的方程组来确定引力场,每个方程又含有数百(注:原文如此)项。此外,这些还不是代数方程而是二阶偏微分方程。

现今这类问题完全采用电子计算机来处理。当然,在施瓦西那个时代除了纸和笔作为仅有的工具之外,别无其他手段。

事实上,广义相对论方面的工作在一定的情形下——即使是在今天——可能仍需要花大量的时间进行艰苦的“手工”(没有计算机的帮助)数学演算,由于公式中含有令人惊愕的项数,这些演算常常冗长乏味且机械重复。我经常向那些为

教科书中广义相对论的辉煌而着迷并愿意从事这方面工作的学生们(有时向研究生和年轻的研究人员)建议,他们应该开始用"手工"计算至少一个在该理论问题中出现的相对简单的量。在这样的计算进行了许多天(有时几个月)之后,这些年轻人并不是个个都愿意努力献身于广义相对论。

为替这种"爱的测试"辩护,应该承认我自己恰恰经历过这种方式(顺便提及,在传奇中为显示两人之间的爱情也是通过英勇的行为来检验的)。在我的学生时代,我的广义相对论导师泽马诺夫(Zelmanov)教授是一个著名的专家和异常谦虚的人。他为我的毕业论文所选的课题与引力场的一个极度迷人的性质有关:如果我们愿意的话,是否存在处处"抵消"它的可能性。"啊,不!"我听到了读者的抗议,"教科书上强调原则上引力是不能被屏蔽的,威尔斯(H.G.Wells)所发明的'屏蔽物'是纯粹的虚构,为大自然所禁止。"

所有这些都是真的。只要我们,譬如说,相对于地球静止,那么它的吸引力是不能够消除的。但是,如果我们在这个场中开始自由下落,则这个引力效应能被完全抵消。自由下落产生失重。在一个关掉发动机并沿绕地球的轨道飞行的宇宙飞船内部是没有重力的:宇航员和他们的仪器在船舱中飘浮,感觉不到重量。在电视屏幕上我们曾多次看到过这种画面。注意任何其他的场,例如电磁场,都不允许这样一种简单的"抵消"。

引力的这个性质与爱因斯坦理论的一个非常复杂的问题有关:引力场的能量问题。某些物理学家认为这个问题至今仍然没有解决。理论公式使我们有可能计算任何质量产生的引力场在全空间的总能量。可是我们不能详细地说明这个能

量在哪里,或在空间特定点的能量究竟是多少。用物理学家的行话来说,一个空间点的引力能量密度的概念是不能引进的。

我的毕业论文的任务是用直接计算来证明即使观察者不是处于自由下落状态,当时已知的引力能量密度的数学表达式也给出了没有意义的结果,譬如说地球上静止的观察者,他们肯定能感受到这个行星所施加的力。我所要推导的数学表达式简直比上面所讨论的引力场方程更麻烦。我甚至要求泽马诺夫教授为我配备一位助手与我同时进行相同的计算:我惟恐出现错误而不自知。可是,泽马诺夫教授知道(但我不知道)最终的目标不仅仅是获得具体的计算结果,而且也是要培养出一个年轻的研究人员。他以一贯文雅但相当肯定的态度说,我必须自己独自去做这个工作。

当全部事情结束之后,我发现日常工作花去了几百个小时。几乎所有的计算都必须进行两次,有时更多。到我提交毕业论文的那一天,工作进度就像引力场中的自由落体速度那样快速地增长。十分公正地说,这个工作的基本要点并没有归结为直接的计算。随着工作的进展,我必须考虑和解决原则性的问题。

这是我在广义相对论方面发表的第一篇论文。

让我们回到施瓦西的论文。采用优美的数学分析,他解决了球对称天体问题,并将这个解寄送爱因斯坦请其呈交柏林科学院。爱因斯坦对这个解极感兴趣,因为到那时为止他自己连一个适合弱引力场的近似解都没有得到。与此相反,施瓦西的解是精确的,适用于球对称质量周围任意强的引力

场，这是一个非常重要的结果。实际上，那时爱因斯坦和施瓦西本人都不知道这个解还包含了更为重要的东西。后来发现它含有对黑洞的描述。

我们再继续有关逃逸速度的讨论。根据爱因斯坦理论，应该给予一个火箭多大的速度才能使它开始离开行星表面并摆脱它的引力从而逃向太空呢？

可以证明答案非常简单：由牛顿理论给出的公式在爱因斯坦理论中仍然有效。因此拉普拉斯关于光不可能从致密的引力质量逃脱的结论得到了爱因斯坦引力理论的进一步肯定，该理论表明逃逸速度在引力半径处必须等于光速。

一个半径等于引力半径的球面通常称之为施瓦西球。

预　言

因此，根据爱因斯坦理论，一旦天体的半径减小到引力半径时，光就不能离开这个天体的表面而到达遥远的观察者，这个天体就变成看不见的了。可是，读者当然会注意到这个极端不平凡的性质肯定不是其尺度缩减到引力半径的天体惟一必然发生的“奇迹”。正如在上一节所解释的那样，恒星达到引力半径时它表面上的引力必定变成无穷大，自由落体的加速度也必定如此。由此能得到什么结论呢？

为了回答这个问题，首先回忆一下为什么正常恒星和行星没有被引力压缩到中心点而是形成平衡的天体。

向心的引力与物质的内部压力相平衡。对于恒星，后者就是由倾向于使恒星膨胀的高热气体所产生的压力。对于地球型行星，它们是张力、弹性力和抵抗压缩的压力。天体的平

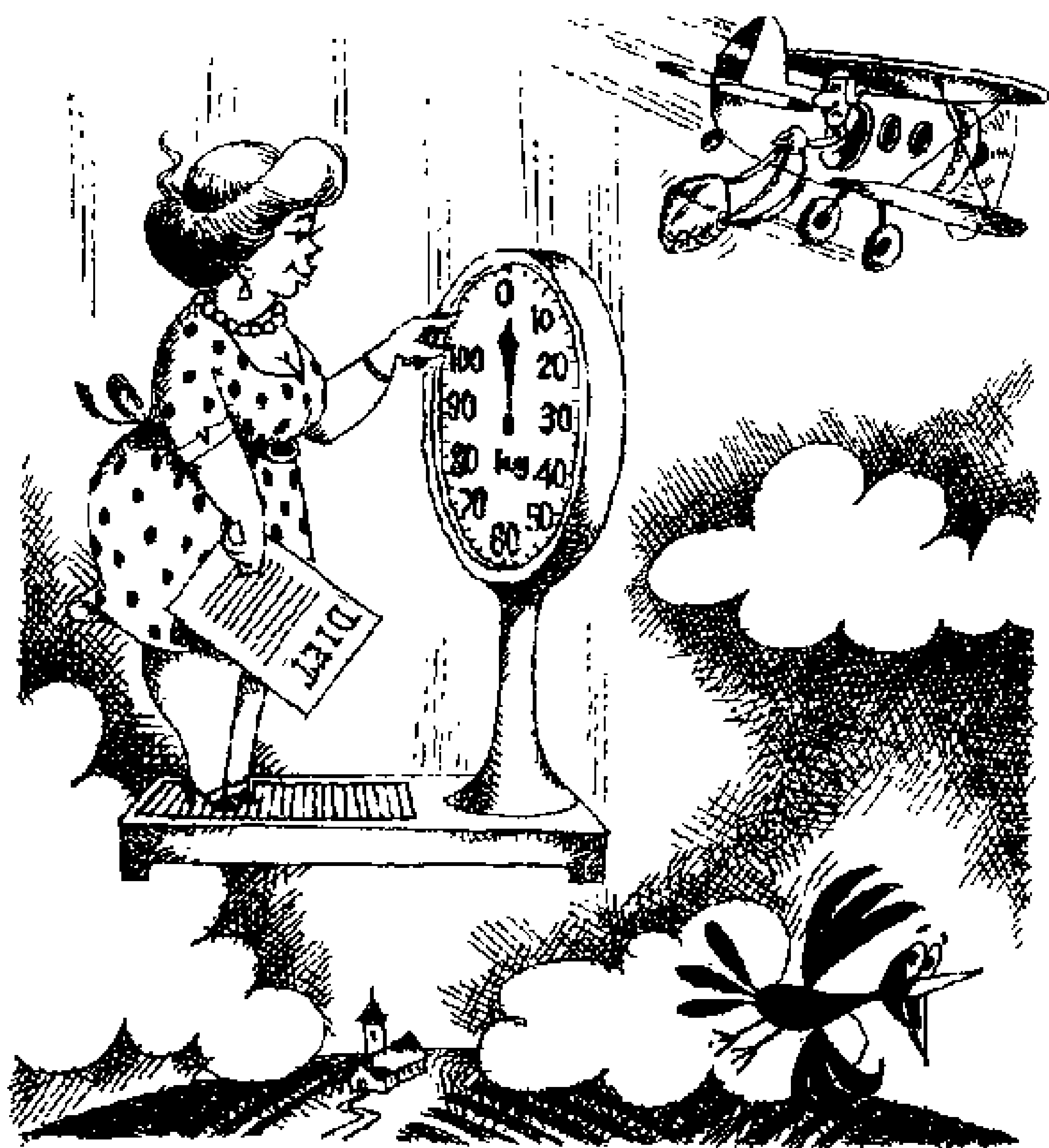
衡是由引力和与之抗衡的力的精确相等来维持的。

后面这些力依赖于物质的状态，即它的压力和温度，它们随着压缩而增加。可是，如果把物质压缩到一个有限的(但不是无限高的)密度，压力和温度也保持为有限。引力的行为则不相同。随着天体的大小接近于引力半径，就像我们已经知道的那样，天体表面上的引力趋于无穷大。现在它不能被有限的抵抗压力平衡掉，这个天体必定毫无阻碍地向中心收缩。

爱因斯坦理论的一个极其重要的结论可以表述为：半径达到或小于引力半径的球对称天体不能维持平衡状态而必定向中心收缩。"但是，请等一等，"读者问道，"如果在引力半径处引力是无穷大，那么当物体的尺度小于引力半径时又会怎么样呢？"

答案十分明显。迄今为止我们已经讨论了在给定时刻没有收缩的静态天体表面上的引力。但是这个力还依赖于运动状态。我们已经说过自由落体导致失重：一个自由下落的物体根本就感觉不到引力。因此，并没有引力作用在自由收缩天体的表面上(在施瓦西球之内或之外)。受引力作用下落的物质在施瓦西球那儿不能停留(否则它将受到无穷大的引力)，在施瓦西球内部更是禁止停留。任何粒子，譬如说一个火箭，无论它有多么强大的发动机，一旦落到离引力中心小于引力半径的地方，必定会毫无阻碍地落向这个中心。至此我们已经回答了当天体接近施瓦西球时引力无限增长的后果这个问题：它产生灾难性的、不可阻止的收缩。物理学家把这种现象称之为相对论性的坍缩。

因而，把一个天体压缩到引力半径那么大小就足够了，进



一步的压缩是自动进行的。这个过程产生的物体现在称之为黑洞。

美国物理学家罗伯特·奥本海默(Robert Oppenheimer)和哈特兰·斯纳特(Hartland Snyder)于1939年首次严格地计算了以上描述的相对论引力坍缩过程。他们的论文是一篇简明易懂的描述之杰作。它只占用了几页的篇幅就给出了对这个

现象完整而令人信服的描述。

奥本海默的知名度远远超出了物理学界。他于1943—1945年参与了美国原子弹的研究并领导著名的洛塞拉莫斯(Los Alamos)科学实验室。后来他认识到发展氢弹和军备竞赛隐含的危险性,大胆地为原子能只能用于和平目的而说话。1953年他被当作政治上不可靠的美国人而被剥夺了所有的政府职位。

奥本海默-斯纳特的论文肯定被认为是严格地预言了黑洞产生的可能性。至于"黑洞"这个术语,却是很久以后,在60年代末期才提出来。它的发明者是美国物理学家约翰·惠勒(John Wheeler)。举例来说,在苏联有一段时间人们称它为"坍缩星",然而这个词在英语中因不悦耳而遭到了拒绝。坦率地说,尽管有精确和清晰的图像,"黑洞"这个术语也导致过一些疑虑。

在1988年于列宁格勒召开的一次国际会议上,曾在黑洞物理学方面获得过许多重要结果的罗马大学的雷默·鲁非尼(Remo Ruffini)和我一道回想起这门科学暴风雨般成长的早期阶段。1972年,包括我在内的几位专家在法国阿尔卑斯山脉莱侯塞(Les Houches)附近的国际讲习班作黑洞理论方面的讲演。讲习班结束后,讲演者聚在一起讨论将讲稿出版为一个单行本的细节。我们必须为这本书取个书名。大家一致同意将这本书叫做黑洞。出乎意料地,这个讲习班的学术秘书(一位来自法国的正派可爱的年轻妇女,她将为这本书准备文字)红着脸指出这个书名将会引起严重的困难。问题是在这本书的封面上必须有英语和法语(的确,全部正文都是英文但讲习班是在法国组织的)两种文字的书名。秘书解释说在

法语中黑洞看起来极端古怪。(当然,我们都用很久以前就成为国际学术语言的英语进行交流,几乎没有一个讲演者的法语是熟练的。)秘书绝对肯定地说没有一家有声誉的出版社会出版一个有这样法语书名的科学书籍。我们不得不妥协。出版的时候,这本书的英文书名叫黑洞,法文书名叫做黑星。你也许会同意,那是某种不太一样的东西。实际上,在后面将会看到我们所讨论的对象不但是黑的,不让光线发出,而且正好是时空中的一个洞。

我们以下面的评述作为本章的结论。

原则上,黑洞可以用人工的方式产生。只需要把质量压缩到它的引力半径大小,此后它将自己收缩,经历引力坍缩。

实际上,这种努力会遇到巨大的技术困难。某物质想要转变成黑洞的质量越小,其压缩必须达到的尺度就更加微小,因为引力半径直接与质量成正比。我们知道地球的引力半径大约是 1 厘米,而一座 10 亿吨的太山要转变成黑洞必须压缩到一个原子核的大小!

后续的章节将揭示在宇宙的自然演化过程中大质量天体可以自发转变成黑洞。然而在开始之前,我们将继续简略地叙述黑洞奇异的特性。



2. 黑洞周围

时间洞

我们已经提到过引力理论,预言了时钟离引力半径越近,时间的流逝就越慢。这意味着不管强引力场中经历了什么过程,在远处的观测者看来它们的步调都慢了下来。

因而他会发现发光原子的振动减慢了,从这些原子发出的光子到达观测者后以一个已减小的频率"红化"了。这种现象叫做引力红移(它是对爱因斯坦理论正确性的检验之一)。目前对我们来说,重要的是发射区域离黑洞的边界(施瓦西球面)越近,时间膨胀和光的"红化"就会越大。对远处观测者而言时间越来越慢,然后"停止不动"。如果观测者跟踪落向黑洞的一块石头,他将会发现随着这块石头接近施瓦西球面,它

开始"减速",而到达黑洞边界则需要无限长的时间。

在恒星物质被引力拉向中心从而产生黑洞的真实过程中,远处的观测者也会看到相同的景象。对远处的观测者而言,恒星的表面要花无限长的时间才能到达施瓦西球面,就好像在引力半径处停顿了下来。这个行为使人联想到黑洞用过的已经过时的术语"冻结星"。

这种停顿并不意味着观测者注定要永远地凝视着停留在引力半径处的恒星表面。让我们回想一下时间膨胀和从强引力场区域所发出光的"红化"。当恒星表面接近引力半径时,观测者渐渐接收到越来越红的光线,尽管在这个表面上所产生的光子本身并没有什么变化。较小能量("红化")的光子以逐渐增大的时间间隔到达观测者那里。光线的强度在减弱。

强引力场引起时间膨胀所导致的"红移"由于多普勒效应产生的"红化"而加重。的确,正在收缩的恒星表面相对观测者在不断地后退,我们知道从一个远离而去的光源发出的光似乎变红了。

多普勒效应和强引力场中时间膨胀的联合作用使我们看不见这颗恒星:随着恒星表面接近施瓦西球面,到达遥远的观测者那儿的光线逐渐变得越来越红,强度越来越弱。它的亮度趋于零,所以任何望远镜都无法探测。对遥远的观测者而言,星光的消失实际上是瞬时的。对于遥远的观测者,具有一个太阳质量已收缩到两倍引力半径处的恒星,它的熄灭实际上只需要十万分之一秒的时间。

探测在引力半径处冻结的恒星表面,雷达也没有用武之地。无线电波传播了无限远的距离到达引力半径处之后决不会再返回到发射它们的观测者那里。这颗星对于观测者而言

是消失了，只剩下它的引力场。在它收缩到小于引力半径的尺度之后，外部观测者再也看不到这颗恒星所发生的事。

“现在请停一下”，读者说道，“如果收缩到引力半径的过程要持续无限长时间，那么说小于引力半径的尺度又有什么用处呢？刚才已经解释了当尺度收缩到等于引力半径时恒星会停下来。那么什么时候恒星会收缩到小于引力半径呢？是在无限长的时间之后吗？”

这一点揭示了广义相对论所发现的一个最令人迷惑而重要的真理：时间间隔的相对性，它们对观测者运动状态的依赖性。回忆一下在狭义相对论中对于不同的观测者，同样的过程有不同的时间间隔：对一个地球上的观测者而言，高速火箭携带的钟的走时比他自己的钟走得慢。这个效应已被直接的物理实验所证实。如果一个时钟向黑洞下落，它以一种引人入胜的方式显示出这个过程中时间间隔的相对性。让我们详细地考察一下。

设想沿着一条始于黑洞中心的直线上排列了一连串的观测者，他们都相对静止于黑洞。例如说他们可以坐在开着发动机的火箭里以防止掉进黑洞。现在再设想另外有一个坐在已关掉发动机的火箭中正在向黑洞自由下落的观测者。当这个火箭下落时，这个观测者以逐渐增大的速度经过静止观测者旁边向前运动。如果这个观测者从很远处下落，他的速度等于逃逸速度。当这个下落物体接近引力半径时，它的速度趋于光速。无疑地，随着速度的增加，在一个自由下落的火箭上时间流逝的速度会减慢。对于任何在固定不动的火箭上的观测者而言，这种减慢是如此巨大，以致那个下落的观测者到达施瓦西球面需要无限长的时间，而后者自己的时钟记录的

时间却是有限的。因而在一个固定不动的火箭上的观测者，他的无限长时间等价于在一个下落火箭中的另一个观测者的有限时间间隔，而且这个间隔相当短：我们已看到对于一个太阳质量，它只不过十万分之一秒的时间。关于时间间隔的相对性，难道还有比这更加具有说服力的事例吗？

根据放置在收缩着的星上的时钟我们发现，这个星在有限的时间间隔内收缩到引力半径并继续进一步收缩。可是我们还记得一个遥远的外部观测者永远都看不到这些演化的后续阶段。那么在收缩星已经消失而进入施瓦西球面以后，在它上面的观测者会怎么样呢？这颗星的命运是什么呢？

我们暂时搁置这些问题而转向黑洞的外部引力场，看看在这个超强场中物体如何运动和光线怎样传播。

黑洞的天体力学

根据牛顿引力理论，在一个恒星引力场中的物体是沿一条开曲线（双曲线或抛物线）还是闭合曲线（椭圆）运动，取决于该物体初始运动速度的大小。在离黑洞很远的地方引力场很弱，用牛顿理论描述所有的现象具有很高的精度，这意味着在这个场中牛顿天体力学定律保持不变。可是，如果我们接近黑洞，将会越来越严重地违背这些定律。

让我们看看天体在黑洞引力场中运动的一些重要特性。

依照牛顿理论，如果一个天体的运行速度小于逃逸速度，他沿着围绕中心体，也即围绕引力中心的椭圆轨道运动。这个椭圆有一个离该中心最近的点（近星点）和一个离它最远的点（远星点）。根据爱因斯坦理论，若天体的运动速度小于逃逸速度，它的轨道也有一个近星点和一个远星点，但不再是一

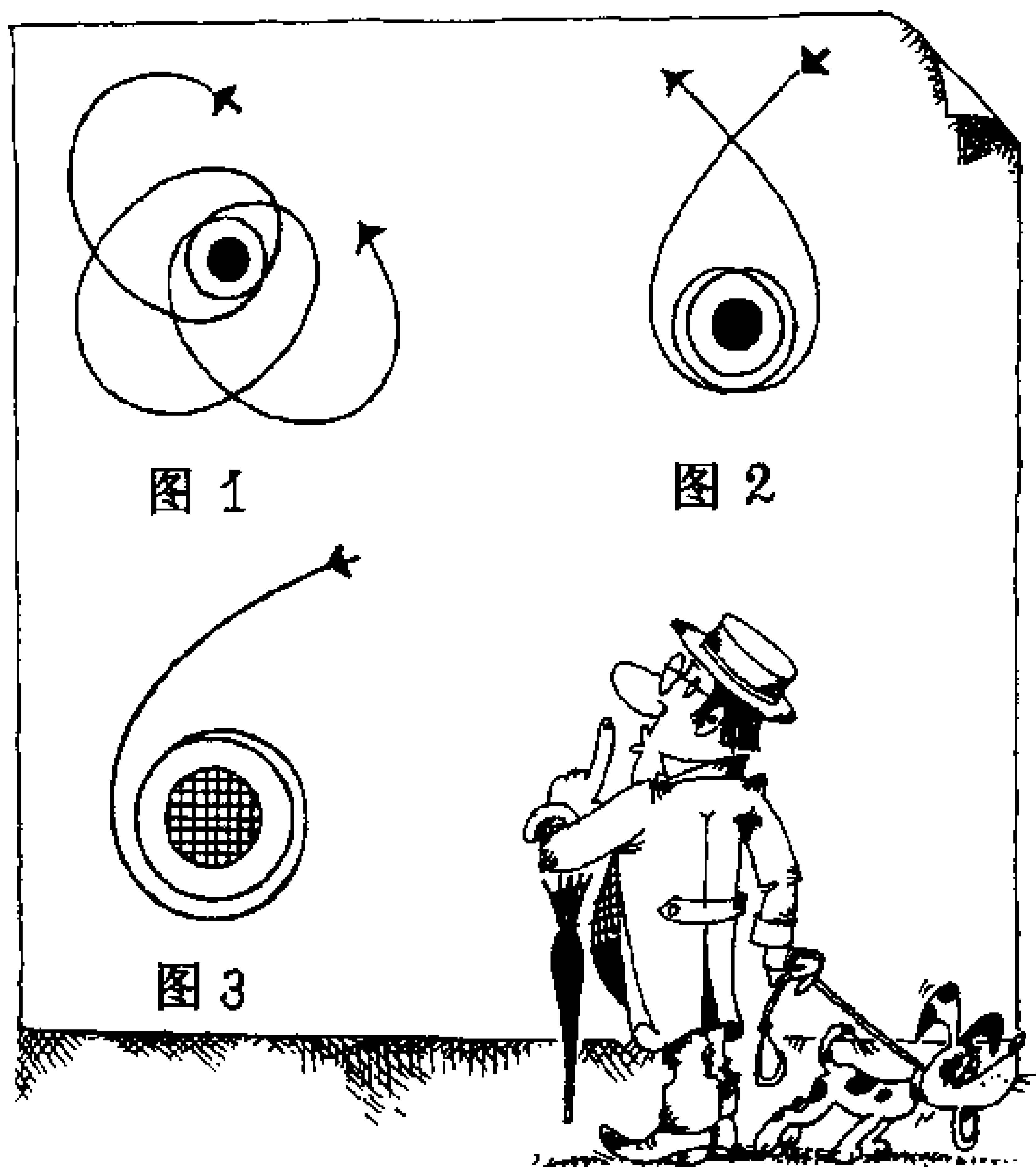
个椭圆，天体循着一个逼近或者远离该黑洞的不封闭的轨道运动。完整的轨道位于一个平面内但形状十分复杂。如果轨道距离黑洞足够远，那么它是一个在空间缓慢旋转的椭圆。水星的椭圆轨道每世纪 43 角秒的缓慢旋转给出了对爱因斯坦引力理论正确性的第一次确认。

讨论一个天体在黑洞引力场中最简单的周期圆周运动是很有趣的。根据牛顿理论，离引力中心任何距离的圆周运动都是允许的。爱因斯坦理论显示情况并非如此。天体离引力中心越近，在圆周轨道上的速度就越高。这个速度在 1.5 倍引力半径的圆周轨道上达到光速。离黑洞更近的圆周轨道运动是不可能的，因为那样的话，天体的运动速度就必须超过光速。

事实上，已经发现在相对论情形绕黑洞的圆周运动在更大一点的距离也是不可能的，除非从 3 个引力半径开始，在那里，运动速度只有光速的一半。为什么呢？

事情是这样的，距离在 3 个引力半径以下的圆周运动是不稳定的。哪怕是一点点的摄动，一个任意小的推动都会迫使该天体离开轨道掉进黑洞或者飞离黑洞进入太空（牛顿天体力学并没有类似这样的预言）。但关于天体力学最有趣而不平凡的预言是黑洞捕获来自太空中的天体的可能性。

读者还记得在牛顿力学中来自太空飞向一个引力体的任何天体绕着该引力体描绘出一条抛物线或双曲线，然后（除非该天体撞击这个引力体的表面）飞离引力体而进入太空，没有引力捕获的可能性。在一个黑洞引力场中情况有所不同。很明显，如果这个天体运行到离黑洞很远（几十个引力半径或更大的距离）的地方，那里引力场很弱因而牛顿力学定律成立，那么它遵循几乎精确的抛物线或双曲线轨道。但如果它运动



到离这个黑洞足够近，它的轨道与抛物线或双曲线就有非常大的差别。如果在远离黑洞处天体的速度远远小于光速而它的轨道经过两倍引力半径的圆周附近，这个天体在飞离以前将绕该黑洞作几次公转。图2显示了这种情形。

最后，如果该天体逼近两倍引力半径的圆周，它的轨道将

缠绕在这个圆周上(就像线缠绕在线轴上),该天体将被黑洞引力捕获而再也不能离开(图 3)。如果该天体进一步逼近黑洞,它将掉进这个黑洞而被引力捕获。

在开始讨论黑洞引力场中的其他物理现象之前还需要作些说明。它与逃逸速度有关。我们已经提到过这个速度遵守牛顿理论的公式,所以一个具有这个速度或更高速度的天体能够永远地摆脱黑洞的拉力而逃离。可是这需要满足一个限定条件。

很明显,如果一个天体精确地沿着半径方向朝黑洞运动,不管它的初速度有多大它都会撞上这个黑洞,永远不会再出现。

此外,我们现在知道即使天体不是沿着径向,只要它的轨道离黑洞足够近,它也逃脱不了被引力捕获的命运。因此,为了使一个天体从黑洞附近逃脱,除了其运行速度要大于逃逸速度之外,运行方向与黑洞方向的夹角必须大于一定的临界值。如果夹角小于临界值,这个天体将会被引力捕获。倘若大于临界值(而且速度超过逃逸值),则该天体飞离而进入太空。这个临界角的值与到黑洞的距离有关。距离越远,临界角越小。如果天体处在几个引力半径处,必须要很精确地瞄准黑洞才能使捕获发生。

最后还有些话与另一个伴随黑洞引力场中运动的重要过程有关。这个现象就是引力波的辐射。爱因斯坦引力理论预言它们一定存在。

具有这样一个奇特名字的波是什么呢?它们与电磁波类似,后者是一种快速振荡的电磁场,它从电磁源那里释放出来并在空间以最大允许速度——光速传播。同样地,引力波是

振荡的引力场,它已经与引力源分离并在空间以光速传播。

为了探测电磁波,原则上只要采用一个充电球并监测它的运动,一旦电磁波开始落到球面上,它就会振动。这是一般常识。实际上,仅一只球不足以探测引力波,至少需要两个相隔一定距离的球(肯定没有必要为这些球充电)。当引力波落



在它们之上时，这两个球交替地相互靠近然后再分开。通过测量这两个球之间的距离就可以探测引力波。读者也许会问为什么一个球不够呢？

理由如下所述。如果没有其他的力作用在球上，它以一种失重状态在引力场中漂浮。这个球感受不到引力，所以探测不到正在传播的引力波。这种情形与我们在一艘沿轨道运行的宇宙飞船中所遭遇到的完全一样。当宇航员失重时，他们感觉不到，也测量不到引力场。两个相隔一定距离的球位于稍微不同的引力场中，因而具有稍微不同的加速度，它导致的相对运动是可以测量的。

探测电磁波也并不是真的需要带电荷的球，因为有各种类型的电磁天线可供利用。大量用于探测引力波的引力天线也已经被设计出来。

引力波的探测似乎只有在理论上才很简单。实际上，在我们所熟悉的任何条件下引力波都是异常地微弱，它们在大质量物体的加速运动中发射出来，甚至在天体的运动中引力波辐射也肯定小得可以忽略。譬如太阳系中的行星运动只不过产生相当于能点亮 100 个电灯泡的引力能。根据我们地球上的标准，即使是这样大小的功率也似乎是可以感知的，然而与太阳发光的功率相比，它是绝对可以忽略的，因为后者要大上一个一千万亿亿（1 后面跟 23 个 0，即 10^{23}）倍的因子。在实验室里设计引力波的发射器注定要失败。

举例来说，引力波发射器可以用一根快速旋转棒来构造。如果我们采用长度为 20 米、质量为 500 吨的一根钢柱，让它以刚好不至于被离心力撕裂的速度旋转（旋转频率大约 30 赫兹），这个装置所发出引力波的功率只不过每秒 1 尔格的一百

万亿亿分之一而已。

这些例子显示了在探测引力波途中的障碍。到目前为止，为了探测宇宙起源信号，尽管在世界各地的许多实验室中已经建造和正在建造的引力天线有好几十个，但在地球实验室中仍未能观测到这些引力波。这个工作的先驱是美国实验物理学家韦勃(Weber)于50年代末和60年代初进行的。在苏联，莫斯科大学的勃拉金斯基(Braginsky)小组十分活跃地从事引力天线的研制。

虽然地球上的天线迄今为止未能探测到引力波，但是一些天文观测直接表明天体运动确实导致了引力波的发射。这些观测是什么呢？

我们已经知道当双星系统中的恒星沿着它们的轨道运动时会发出携走能量的引力波。一般来说，这种能量损失非常非常小。可是，天体的质量越大，它们之间的距离越小，引力波的发射就越强。双星系统的能量损失导致两颗恒星渐渐接近和绕质心公转周期减小。当然，这是一个非常缓慢的过程，然而，特殊的观测方法已经使天文学家做到了在一个实例中发现了周期减小与爱因斯坦理论的预言精确一致。这里不再详细地描述这些天文观测，那将使我们偏离主题太远。我只想提到美国新泽西州普林斯顿大学的罗塞尔·赫斯(Russell A. Hulse)和约瑟夫·泰勒(Joseph H. Taylor)于1993年因这些观测而获诺贝尔物理学奖。

现在回到黑洞圆周轨道上天体的运动。它伴随着引力波的发射和轨道半径的渐渐减小。这个过程要一直持续到轨道半径减小到3个引力半径的水平。我们知道在更小的距离，运动是不稳定的。因此，在已经到达临界轨道并旋转几圈之

后，该天体发射出一定的能量后坠入黑洞。

在半径缓慢减小的圆形轨道上围绕黑洞运动的过程中，物体以引力波的形式发射了多少能量呢？我们看到了这种发射的强度极低。可是，这个过程持续了极其漫长的时间！发射能量的总和数量很大。我们可以使用下述对比来估计这个能量。我们知道在核转变过程中，例如氢转变成氦或者更重的元素，有一定比例的质量转化为能量。在所有类型的核反应中，这个比例最多不超过百分之一。但在围绕黑洞运动发射引力波的情形，其百分比达到它的6倍。

我们发现即使是以这种最简单的方式，黑洞也能用来作为一个能源。当然，这个装置没有实际的用途。问题在于引力波与物质的相互作用微弱得难以想象。以引力波的形式释放的能量，它的收集和投入实际应用都极为困难：引力波弥散在整个宇宙空间。后面将会看到还有其他的方法来利用黑洞巨大的引力能。

黑洞和光

我们知道引力场对光也有作用。它改变光子的频率并使光线的轨道弯曲：离黑洞越近，轨道的弯曲程度越大。图4显示了离黑洞不同距离的地方发出（与半径垂直）的光线的路径。注意1.5倍引力半径处的临界圆圈（前面一节已经提到过它）。被黑洞强大的拉力囚禁在这个圆圈上的光子沿着这个圈自由传播。可是，这个运动是不稳定的，任何微小的摄动都会使光子掉进黑洞或者遁入太空。

光子的临界圆意味着离黑洞足够近的光将会被它的引力捕获（如图5所示）。非常接近1.5倍引力半径圆圈处的光线

将无穷无尽地缠绕在这个圈上，而更近的光线终止于黑洞之上。

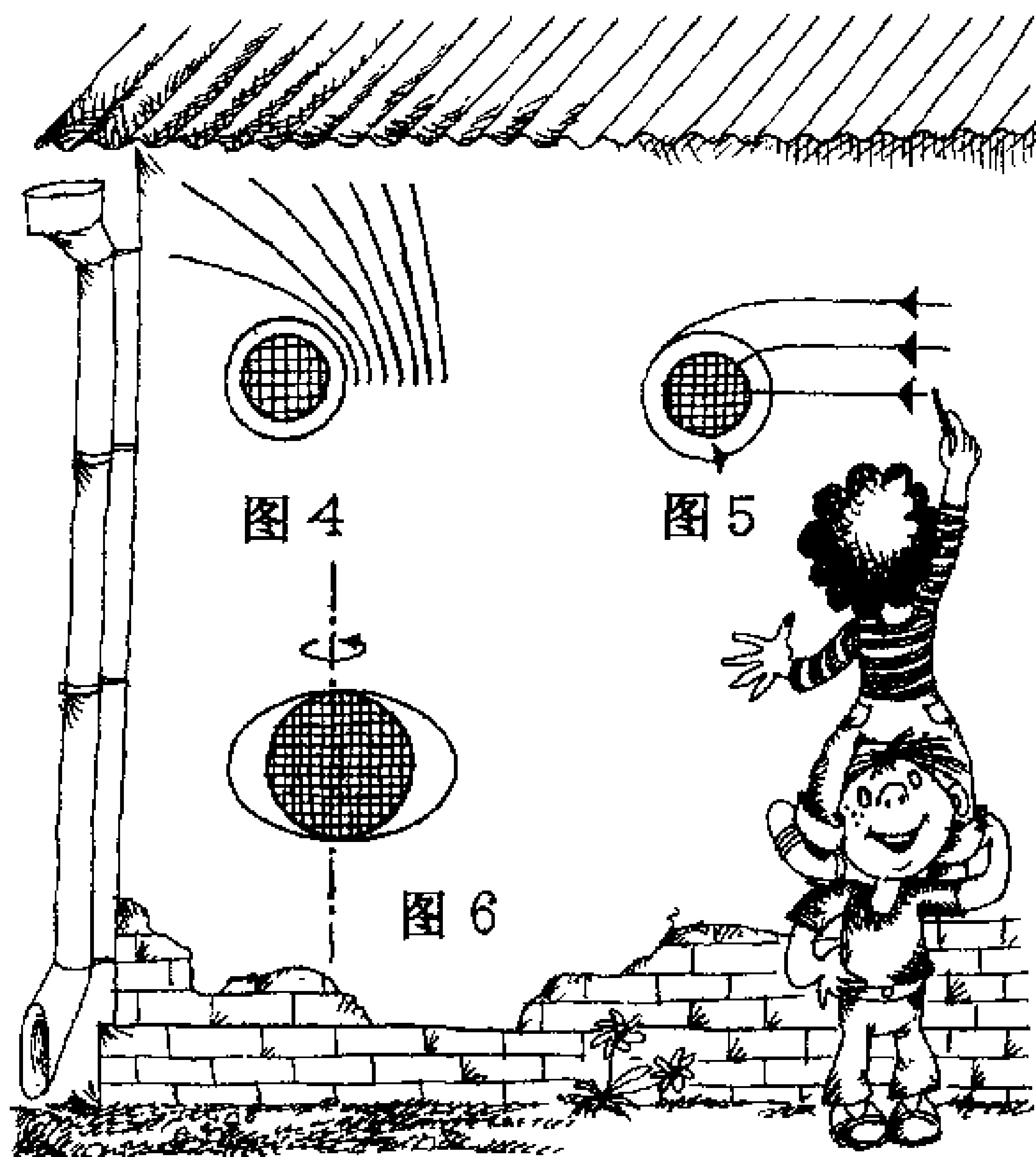
光在黑洞附近的传播改变光波的频率：离黑洞越近，振荡频率增加的幅度越大。当光沿远离黑洞方向传播时，它的频率减小。这些变化只有在施瓦西球附近才可以感知，在离黑洞相当大的距离处它们非常微小。

黑洞无毛

迄今为止我们所讨论的仅仅是球形物体压缩形成的黑洞，因而具有球对称引力场。如果一个非球形的，譬如说一个扁平的天体正在收缩，它会形成什么样的黑洞呢？我们把旋转问题留到下一节，这里只涉及不旋转的天体。

假定在压缩之前，一个天体具有非球对称的引力场。它是否意味着坍缩会产生一个具有扁平引力场的扁平黑洞呢？很长一段时间内这个问题的答案都是未知的，直到前不久才得以解决。业已证明不可能存在扁平的或其他任何类型的不对称黑洞。关键在于在收缩过程中，当天体的大小接近引力半径时，发生了引力波的强烈发射。可以证明引力场对严格球对称的所有偏离将会缩小并以引力波的形式辐射掉。

在黑洞诞生的一开始，它确实具有一个扭曲的、扁平的形状。但是这个形状不能够长期存在。就像一个肥皂泡那样，在我们拉伸和放开它之后，它能迅速地恢复到球形。一个扭曲的黑洞的边界也能很快地重新获得光滑的球形。所有的多余物都作为引力波而被辐射掉，其结果是产生一个具有完全对称施瓦西引力场的完全球对称黑洞，它的特征由一个单一量，即引力中心的质量来刻画。



因而黑洞可能大一点(质量大)或者小一点,但其他所有方面都是一样的。于是马上出现一个问题,如果这个正在收缩的天体具有一些电荷,也就是说,如果它被电场、磁场或其他场(除引力场之外)包围的话,会发生什么事情呢?这个天体所产生的黑洞也具有这些场吗?

对这个问题的分析产生一个极为有趣的结果。已经发现

在相对论性的坍缩期间，各种类型的物理场都被辐射掉或者被埋葬在黑洞之中。电荷是仅有的例外。这个电场就像球对称引力场一样根本不变并继续包围着黑洞。

这样我们已经看到了任何非旋转天体的相对论性坍缩，不论它的形状，不管它被电场、磁场或其他场所包围，其结果是产生一个黑洞。仅由下述两个参数就完全刻画了它的性质：决定外部引力场强度的质量和决定电场的电荷。形成黑洞物质的所有其他特征似乎都消失了。没有任何有关黑洞的测量和实验能够揭示它是由物质还是反物质构成的，它原先是否具有磁场，等等。“遗忘”所有特征这个性质的一个根源在于任何信号都不能逃离黑洞而到达外部空间。

先把对天体而言相对不重要的电荷现象放在一边，我们把剩下的质量作为决定黑洞性质的惟一特征。所有具有相同质量的黑洞相互都是精确的复制品。这种黑洞不露真面目使得美国理论物理学家约翰·惠勒(读者已经熟悉)得出“黑洞无毛”的格言。

建造这个不露真面目的理论模型是天体物理学中一项艰难的任务。正像黑洞的理论预言一样，它也有自己过去和当时的发展过程。

我只说一下提出这个结论的两篇论文。这个工作完成于60年代中期。我是第一篇论文工作的见证人并参加了第二篇论文的工作。第一篇论文的作者是苏联物理学家维塔利·金茨伯格。他想计算如果恒星的半径被一直压缩到前所未有地小时它的磁场有多大。他发现，如果恒星几乎压缩到引力半径，然后停止压缩，那么非常贴近恒星表面的磁场异乎寻常地增强了。随后精确地压缩到引力半径，将使得表面磁

场强度增加到无穷大。但这是荒谬的！我清楚地记得当时金茨伯格教授在斯天堡(P. K. Shternberg)天文研究所报告他的结果时的热情和激动，以及专家们讨论这些结论时的陶醉。这个结果的重要性是巨大的。的确，如果黑洞周围存在非零磁场的假设产生一个荒谬的结论(确实如此)，那么黑洞就根本不可能有任何磁场！磁场一定是被完全辐射掉或是埋葬在黑洞之中。

这是一个很出乎意料的结论，专家们花了相当一段时间才习惯它。

第二篇论文涉及到形成一个扁平黑洞的可能性。那时候我刚从大学毕业并开始在雅柯夫·察尔多维奇(Yakov Zel'dovich)教授召集的一个小组里工作。我已经为扁平黑洞问题激动了好几年，并同我们的教授和我的一个同事，安德列·多罗斯柯维奇(Andrei Doroshkevich)一起讨论这个问题，后者也开始在我们新成立的小组里工作。我们三个人开始全面地解决这个问题，每个人采用自己的工作方法，相互补充，我们成功地进入了一个广阔的领域。

不久，我们发现如果新形成黑洞的形状扁平如芜菁或者细长似黄瓜，那么这种扁平或细长的程度必须是无穷大！这是没有意义的。我们必须得出的结论是扁平或细长的黑洞都不可能形成。任何对球形的偏离必定作为引力波辐射掉，然后偏离，自行消失。

我上面描述的两篇论文有一个重要的共同特征：它们预言了黑洞形成必定涉及引力波的辐射。这个结论似乎是大胆得超出了情理之外。的确，我们没有计算辐射过程本身：当时我们不能做，只不过是因为所需要的数学技术还没有发展

起来。但是,关于辐射过程结果的这个结论是绝对可靠的,因为与之不同的结论将产生荒谬的结果。这是一个有趣的例子,它显示出对于一个过于复杂而无法计算的现象,你如何才能从其后果中得出正确的结论。仅仅六年之后,美国理论物理学家理查德·泊莱斯(Richard Price)以及后来其他许多人都成功地计算了这些场的辐射过程。正像所预期的那样,他们的结果证实了我们结论的正确性。

泊莱斯和其他人的计算揭示了如下不寻常的事实:所有能被辐射掉的场在相对论性坍缩过程中确实在辐射。只有两种场从不辐射:球对称的引力场和球对称的电场(如果黑洞带电的话)。它们是黑洞最终保留的场。

还有一个例外将在下一节给予描述。

物理学家们都熟悉契斯霍姆(Chisholm)定律。它们以诙谐的形式反映了实验工作者在他们的工作中所遭遇的并非玩笑的困难。契斯霍姆定律的第一条说:"所有能出故障的东西都会出故障。"类似地,理查德·泊莱斯以下述形式阐述他的结论:"所有能被辐射掉的东西都被辐射掉了('允许的就是必然的')。"

在本节开始,我们特意把主题限制为非旋转天体产生的黑洞。这个限制并非偶然。也就是说,一个旋转的坍缩天体产生一个旋转的黑洞。我们将在下一节看到旋转引起引力场的变化因而构成描述黑洞特征的第三个(也是最后一个)参数(在质量和电荷之外)。

黑洞周围的引力旋涡

根据牛顿理论,引力场决不依赖于物质的运动。因此对

于一个旋转球和一个静止球来说，只要它们的质量相等，它们的引力场就完全一样。根据爱因斯坦理论，这两个球的引力场稍有不同。差别是什么呢？

这个差别最直观（有些过于简单化）的图像是旋转天体周围有一个附加的旋涡引力场，它拖动所有的物体作圆周运动。另一幅图解显示各层空间围绕该天体缓慢地旋转，旋转角速度是距离的函数：远离该天体时它很小，当我们接近该旋转天体时它随之增加。对普通天体而言，这些效应可以忽略。最容易的测量方法是在旋转天体附近放置一个陀螺仪。如果该天体是静止的，陀螺仪所指的方向相对于遥远的恒星就不会变化（使用陀螺仪，例如说为空间探测器定向是众所周知的）。可是，一旦接近旋转天体，陀螺仪的轴就缓慢地转动。离旋转的地球表面很近的陀螺仪每年大约转动十分之一角秒。当然，这样微小的转动速度并不影响宇宙飞船的定向。此外，迄今为止，实验上还没有观测到这个效应。

在第一章中提到的中子星，在其表面上的陀螺仪轴的转动角速度可能非常高，只比中子星本身的转动角速度小几倍。这些恒星能够以每秒几十圈或更高的速度转动。在这样一个快速旋转恒星附近的陀螺仪可以以每秒很多圈的速度公转！当这颗恒星经受相对论性的坍缩时，其引力场的旋涡部分将会发生什么情况呢？

已经证明就像球对称引力场保持不变那样，这个旋涡部分也是保持不变的。

恒星的旋涡引力场完全由物理学家称之为物体角动量的那个量所决定。对一颗普通恒星来说，这个量近似等于赤道处的转动速度、恒星质量和恒星半径的乘积。

因此，旋转天体的坍缩产生一个旋转的黑洞。它意味着什么：黑洞的旋转吗？它意味着这个黑洞被坍缩遗留下来的旋涡引力场所包围，有时这个场也叫做引力旋涡。离该黑洞越近，这个旋涡场越强。

它的后果是什么呢？

首先，旋转使得黑洞在两极变得扁平一些，就像旋转也使地球和恒星变扁那样。读者还记得如果没有旋转，黑洞是精确球形的。但这不是主要的方面。没有旋转的话，施瓦西球面上的引力变成无穷大。这个球面构成了黑洞的边界，或者按照物理学家的说法，不让任何东西出来的视界。旋转改变了这个行为。在视界之外叫做能层的表面上引力变成无穷大。这个限制表面如图 6 所示。黑洞旋转得越快，能层展开得越远，但不能离开黑洞视界太远。

当一个物体到达能层边界或者穿过它时，任何力都不能使这个物体保持静止。旋涡场拖着它相对于黑洞运动。可是，与处在施瓦西球上（在没有旋转的情况下）无法抗拒地被拉向中心的物体相形对比，所有处在能层表面上的物体都被拖进绕黑洞的旋转运动。它们并不一定要向中心靠近：它们可以接近中心，也可以后退，还能够或进或出地穿过能层。

这里出现的问题是：对于处在受引力影响的能层表面之下的一个物体，如果这个引力在该表面上已经变成了无穷大，这个物体会怎么样呢？

我必须重复一下在讨论作用在施瓦西表面物体上的力时所用过的论点。

在该表面上引力为无穷大只是对静止的物体而言，如果物体有加速度的话，这个力是不同的。如果该物体在黑洞旋

转的方向上作环绕运动，可以发现在能层表面甚至内部这个力都是有限的。因此，一个物体可以在能层之内沿圆周轨道运动而不会向中心下落。这意味着与施瓦西球相比，旋转强烈地改变了静态界限（即一个物体能够相对于该黑洞保持静止的区域边界）。

因此，能层表面不是黑洞的边界，这是由于它允许物体从它的下面逃离出来。我们来看看当物体趋近于黑洞时会发生什么情况。

向黑洞运动的物体最后到达黑洞的边界——它的视界。在这个表面之上和之下的物体（任何粒子和光子）都只能进入黑洞。向外运动受到禁止，在视界内部的任何信息都不能到达外部观测者那里。

视界和静态界限之间的空间也叫做能层。在这里引力迫使所有的物体环绕黑洞运动。

如果将一个陀螺仪慢慢地移近能层表面，它的角动量就会增加，在这个表面上趋于无穷大（对静止的陀螺仪而言）。

如果一个物体从很远的距离向旋转黑洞下落，远处的观测者会看到什么呢？

在它向黑洞下落过程中，首先该物体的轨道向黑洞旋转方向偏离，与能层相交，然后渐渐地接近视界。不管这个物体落在视界哪个位置，它的角速度总是相同。这是旋转黑洞的一个很重要的性质。在能层内部物体的角速度可能会变化，但是，一旦它们到达黑洞表面，这些物体就具有同一个角速度，就好像粘贴在旋转固体的表面上那样与黑洞表面一起旋转。

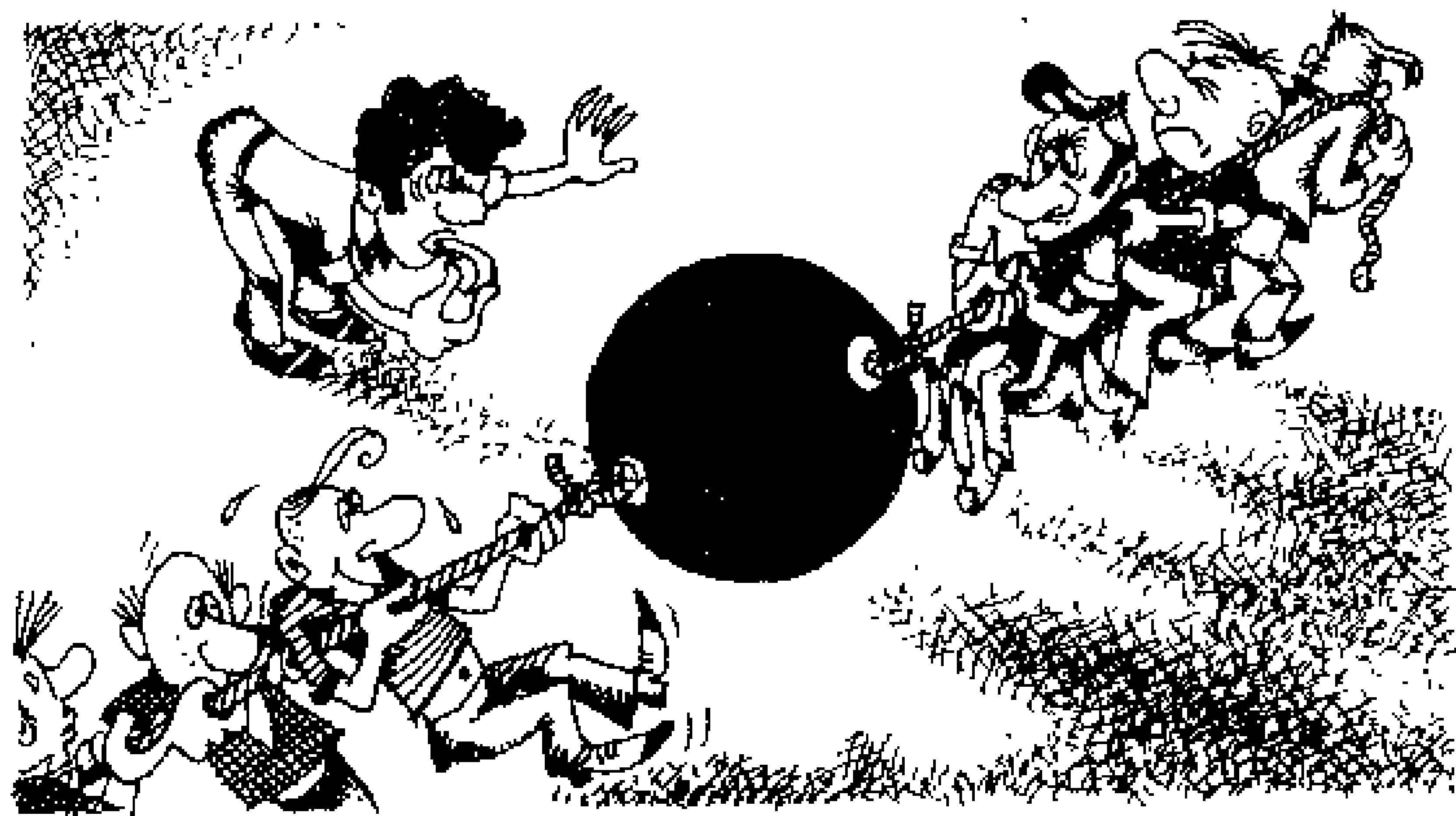
对一个外部观测者而言，从这些物体上发出的光变得越

来越红、越来越弱，然后完全消失，变成看不见的物体：远处观测者看不到视界以下继续发生的事情。可是，如果这个观测者向一个旋转黑洞自由下落，就像非旋转黑洞的情况一样，他在有限的时间内到达视界，并继续掉进黑洞内部。我们现在先不管这个观测者，还是回到外部空间，即黑洞的附近。

黑洞的旋转不可能太快。关键在于如果母体旋转得太快的话，就不能形成这个黑洞。确实，一个旋转得足够快的天体收缩时在赤道上产生的离心力将会阻止赤道平面内的收缩。该天体只有两极才能继续收缩。因此，它变成一个其半径远太于引力半径的“薄煎饼”，这样黑洞就不能形成。当赤道上的速度达到光速时，黑洞的旋转速度就达到了可能的最大值。

在旋转黑洞情形下，天体力学定律也发生了变化。例如，考虑黑洞对物体的引力捕获效应，如果黑洞是旋转的，最容易捕获的是在黑洞附近逆着它的旋转方向运动的粒子，而沿着相反方向(顺着旋转方向)运动的粒子最难捕获。一个合适而形象化的比喻是黑洞周围引力场的旋涡部分好像一个投石器：它把经过黑洞附近且运动方向与该旋涡场相同的粒子加速并扔掉，但使得逆着该旋涡运动的那些粒子减速并捕获它们。

这里还有一个说明天体力学定律发生变化的例子。如果一个物体在圆周轨道上以最大可能的公转速度围绕旋转黑洞公转，它以引力波的形式发射的能量是围绕非旋转黑洞运动时的 7 倍。



3. 作为能源的引力深渊

无底的黑洞

我们已经多次提到物体围绕黑洞运动辐射引力波是一种产生能量的方法。可是，这并不是从黑洞中抽取能量，而是从在轨道上运动的物体中提取了能量。的确，最后该物体（和部分引力波）将掉进黑洞中，因而增加了它的质量，也就增加了它的能量。

现在的问题是：是否有可能减少黑洞的质量并从中提取能量呢？

乍一看来这似乎不可能，因为黑洞禁止任何东西跑出来，所以不能从视界之下提取能量。这个前提是正确的，但是其推理忽略了一个事实：一个旋转黑洞能否有部分能量（因而也是部分质量）精确地与旋转有关，并以旋涡引力场的形式存在于

黑洞之外？现已发现能量的这个“旋转”部分确实能够从黑洞中抽出来，从而减小了它的质量。怎样才能做到这一点呢？

设想一下如下的实验。一个关闭了发动机的火箭进入了一个旋转大黑洞的能层。它沿着黑洞旋转的方向绕着该黑洞运动。在非常靠近黑洞时驾驶员打开发动机，排出废气。他可以改变火箭的运动以便让废气落入黑洞之中，而火箭获得加速并以巨大的速度从能层中抛射出来，就好像被一个“投石器”即引力旋涡发射出来。火箭的速度远远大于接近黑洞时的速度，也远远大于发动机短时间内所产生的速度变化。究竟发生了什么事情呢？

读者还记得黑洞周围存在一个旋转的引力旋涡。火箭发动机驱使该火箭进入一个新轨道，它被引力旋涡抓住并以极大的速度从能层中猛烈地抛射出来。火箭带走的能量是由这个旋涡提供的，也就是说它来自于黑洞的转动能。其结果是黑洞的旋转减慢。黑洞的总质量也相应地减小（去掉火箭带走的那部分）。这就是从黑洞中提取能量的方法。

这个极不寻常的过程是英国理论物理学家罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）发现的。我们已经强调了这个过程只是从黑洞外部的旋涡场中抽出转动能。

在上述过程中，由于火箭发动机排出的废气掉进黑洞之中，增加了黑洞的质量和它的大小，因此也稍微增加了它的视界面积（它是一个描述黑洞尺度的量）。

如果正好在视界上时开启发动机，火箭（在发动机开启的一小段时间）可以从黑洞中携带走最大限度的转动能。在这种情况下视界面积保持不变（这样的过程叫做可逆过

程)。发动机在视界上的这种操作可以重复无数次,一直到最后黑洞失去其转动能,但保持视界的大小不变。

关于是否有减小视界大小的过程存在,回答是否定的。现在已经发现任何过程都不能减小黑洞的视界面积。如果几个黑洞相互作用,它们的视界面积之和是不能够减小的。

这是一个由著名的英国物理学家斯蒂芬·霍金确立的非常重要的性质。例如,它隐含着一个黑洞绝不可能分裂成为两个子黑洞。假如这个过程真的能发生的话,子黑洞的视界面积之和必定小于其母黑洞的视界面积,但保持黑洞的能量守恒。结果是,任何引力潮汐力或其他因素都不能把黑洞撕开。

黑洞的合并是可能的。例如,两个黑洞迎面碰撞结合成一个黑洞。结果所形成的黑洞的视界面积大于碰撞黑洞的视界面积之和。

任何使得黑洞尺度减小的过程都是不允许的。

黑洞一旦产生,它就像一个用任何东西都不能填充或堵塞的无底悬崖:它们是时间和空间中的"永恒之洞"。它们能够生长,只是要以物质掉入其中为代价。它们是不停地生长的引力深渊。

实际上,正如稍后将要描述的那样,情况并不是那么糟糕。首先,在实际情况中黑洞巨大的引力场能够激起极为猛烈的过程。其次,量子过程(到目前为止我们还没有考虑它们)将对以上简略描述的图像作一些修改。本书稍后再讨论这个主题。

引力炸弹

在分析黑洞附近的过程和从黑洞中提取出能量的方法中，我们已经发现所提取的能量既可以表现为辐射引力波的形式，也可以作为从能层中抛射出物体的动能。可是，甚至更令人惊奇和难以预料的使用黑洞作为能量产生器的方法也已经被发现。

设想用电磁波来照射一个旋转黑洞。结果会怎么样呢？乍一看来，没有什么有趣的事情发生。一部分电磁波被黑洞捕获并永远消失。经过黑洞附近的其他电磁波的轨道弯曲，并向远处传播。这种传播方向改变的现象称之为波的散射。离开黑洞的散射电磁波与其入射时的频率相同。当然，在穿过黑洞强引力场的运动过程中波的频率确实是变化的。在趋近于黑洞时，波的频率增大因而能量也增大：这是蓝移。在离开黑洞的过程中，这些波经历红移，远离黑洞时其频率回到初始值。

总的来说有如下一幅图像。当一个黑洞被照射时，一部分电磁波被黑洞吞噬、而另一部分被黑洞散射，在散射前后其频率不变。由于黑洞捕获了一部分电磁波，所以散射波的强度小于照射束的初始强度。

到目前为止，上述图像还没有多大的用处。可是，散射电磁波的强度超过其入射电磁波的强度的情形也是有可能发生的。要使这种效应成为可能得有一定的条件：第一，黑洞是旋转的，因为只有转动能才能提取出来；第二，照射到黑洞之上的入射电磁波的频率必须小于该黑洞的自转频率。这就是散射电磁波强度大于入射束强度的情况。这个放大过程叫做

超辐射。它是泽尔多维奇教授发现的。超辐射实际上类似于早先所讨论的以黑洞的转动能为能源,从黑洞能层中抛射出来的物体能量增强的过程(超辐射的能源也是黑洞的转动能)。注意当电磁波照射一个旋转黑洞时,其放大因子很有限——至多4.4%。

当其他类型的波照射黑洞时也出现超辐射现象,因此黑洞也会增强低频的入射引力波。任何类型的辐射产生超辐射的必要条件都相同:波的频率必须足够低。但已发现对于不同的辐射其放大因子并不一样。它对引力波的放大因子达到138%,远远大于对电磁辐射的放大因子。

但我们还是回到电磁波的情形。

设想有一个反射电磁波的人工球面围绕着旋转的黑洞。在这个球面的内部有满足超辐射条件的少量的电磁波。这些波落到黑洞上,被放大,然后传播出来。到达外面包围的球面之后,它们被反射回到黑洞,重复放大过程。这个过程一次又一次地重复,结果所放大辐射的能量像雪崩一样地增加。

如果在反射球面上挖一个洞,部分被放大的波将穿过该洞而逃脱,我们的"装置"起到一个电磁辐射发生器的作用,直接把黑洞的转动能转变成电磁辐射。

现在假定该球面没有洞并且它的壁完全反射放大的电磁辐射。那么在这个装置内部电磁能强度的持续增加达到了灾难性的程度,辐射压力将球面撕裂,发生了系统爆炸。这个发明物叫做引力"炸弹"。

注意,这种产生电磁能的引力装置目前是绝对行不通的,因为我们还不能通过对物质的超强压缩来人工制造黑洞,而

天然黑洞如果存在的话也是位于非常遥远的宇宙空间。

濒临引力深渊

到目前为止已经叙述了黑洞附近的空间。现在开始转向一个最迷人和最令人惊奇的方面：我们尝试着逼近黑洞的边界，这个无底深渊(任何东西也装不满)的边缘，然后对它进行观察和研究。

实际上，在这儿我们知道“观察”这个词是没有保障的。即使到达了黑洞的边界，除非继续深入其中，否则看不到在其内部发生的事情。原则上深入内部进行观察是可能的。举例来说，只要我们在黑洞引力场中(乘坐一艘宇宙飞船)自由下落就行。根据他自己的时钟下落的观测者在有限的时间内到达视界并继续进一步下落。

我们已经知道对这位宇航员来说这次航程不可避免地具有最严重的后果。的确，黑洞不会返还任何东西，不让任何东西进入外部空间。无论火箭发动机的动力有多么大，这位宇航员永远无法返回。他也不能将他观测的信息发送出来(虽然他能够收到我们的消息)。然而，这次航程原则上是可能的。黑洞内部有什么在等待着这位旅行者呢?

在我们继续与这位宇航员一起旅行之前，先回想一下另一个非常熟悉的引力现象：引力潮汐力。这个力的产生是由于任何物体在引力场中都有一定的大小，而引力场又绝不是均匀的。因此被吸引物体在不同点经受的引力拉力也稍有不同。

把一个物体放在行星的引力场中，物体靠近行星的点比远离行星的点所受的拉力要更强一些。这些引力之差叫做潮

汐力,它有拉伸和使物体分裂的趋势。引力场中的逐点变化越急剧,潮汐力就越强。在自由下落和静止两种情形下都能感受到这种差异引起的力。这与引力本身形成了明显的对比,在自由下落中引力是无法感知的。

在通常条件下,譬如说在一个处于环绕地球轨道上的宇宙飞船之中,潮汐力当然不足以引起注意并且可以忽略。地球上的普通物体也是如此。可是,潮汐力与物体的大小成正比。因此,对于处在月球引力场中的整个地球而言它们是相当可观的。这些力引起海洋的潮汐,并因此而得名。

现在让我们回到掉进黑洞的观测者。首先把他放在正在进行相对论性坍缩的恒星表面上。现在恒星物质的压力对于不断增强的引力压缩实际上并不形成什么阻碍,恒星表面穿过引力半径并继续进一步收缩。这个过程无法停止,经过很短的时间间隔(根据恒星表面上观测者的时钟)表面压缩成为一个点,其密度趋于无穷大。物理学家把这种状态称之为奇点。它有些什么特征呢?

不考虑细微之处,对这个问题可以给出如下回答:在到达奇点的途中,潮汐引力趋于无穷大。这意味着任何物体(包括我们假想的观测者)都将被撕裂。同样的命运等待着该恒星坍缩之后掉进黑洞的所有物体,它们也将到达奇点。一旦物体进入视界以内,是否有可能阻止它掉到奇点呢?

这已经被证明是不可能的。向奇点的下落是不能停止的。不管采取什么措施或者火箭发动机的动力有多大,也无法阻止宇航员很快地陷入奇点。

在穿过视界之后火箭在黑洞内部能存活的"最长"时间大

约等于光走过相当于黑洞大小的距离所花的时间。这个持续时间非常短。对十个太阳质量的黑洞来说，最长的寿命只不过十万分之一秒。

为了存活这样"长"时间，宇宙飞船必须执行如下的操作：在向黑洞下落期间，调节发动机油门达到最大功率以使得飞船在视界处几乎停止，然后关掉发动机让飞船沿着半径方向(从视界到奇点)自由下落。这个下落的持续时间就是最大寿命。宇航员使用喷气发动机减缓向黑洞的下落或把飞船送入轨道运动的所有努力都只会缩短向奇点下落的时间(根据宇航员的时钟)。

这怎么可能呢？读者迷惑不解。他同意发动机不能克服黑洞中无法抵抗的引力拉力而使宇宙飞船停止，但想必制动至少会使得下落减缓一些，因而寿命更长一点。此外，对这一下落加速运动，制动难道没有意义吗？

不，在黑洞内部这样改变事件确实是有可能的。问题在于宇航员对他的火箭(记为 A)加速是相对于自由下落的火箭(记为 B)而言的。早些时候我们已经提到在一个加速火箭中时间流逝得更慢一些。在黑洞中它变成了决定性的因素。从火箭 B 的立场来看，向奇点下落的火箭 A 的时钟总是大大减慢了，以至于根据 A 的时钟整个下落过程花的时间更少。由于更慢，A 的时钟"走过"的秒(或一秒的一部分)数更少，即这个时钟显示下落时间更短！这的确是一个似是而非的论点。

让我们回到引力潮汐力问题。我们来比较一下在环绕地球的轨道上和向黑洞下落的宇宙飞船中作用于宇航员身上的潮汐力。

在前面的情况下，潮汐力对宇航员身体的拉伸是绝对可以忽略的，它只相当于一百亿分之一个大气压。

在后面的情形中，到达黑洞边界时潮汐力已经非常大。业已发现黑洞的质量和尺度越小，在视界处的潮汐力就越大。对1 000个太阳质量的黑洞来说，潮汐力与100个大气压相当。人体不能够承受这样大的负荷。对于再小一些的黑洞，视界上的潮汐力甚至更大。

因此，如果一个黑洞的质量小于1 000个太阳质量，那么一个接近黑洞的人与潮汐力相遇之后无法幸存。

很明显，即使宇宙飞船正掉进一个非常大的黑洞，它边界上的潮汐力对人体并不是致命的，但是进入黑洞的飞船最终将冲向奇点，潮汐力将不受限制地增长，任何物体都将不可避免地被粉碎。显然，没有一个宇航员会心甘情愿地深入黑洞之中，除非他想自杀。

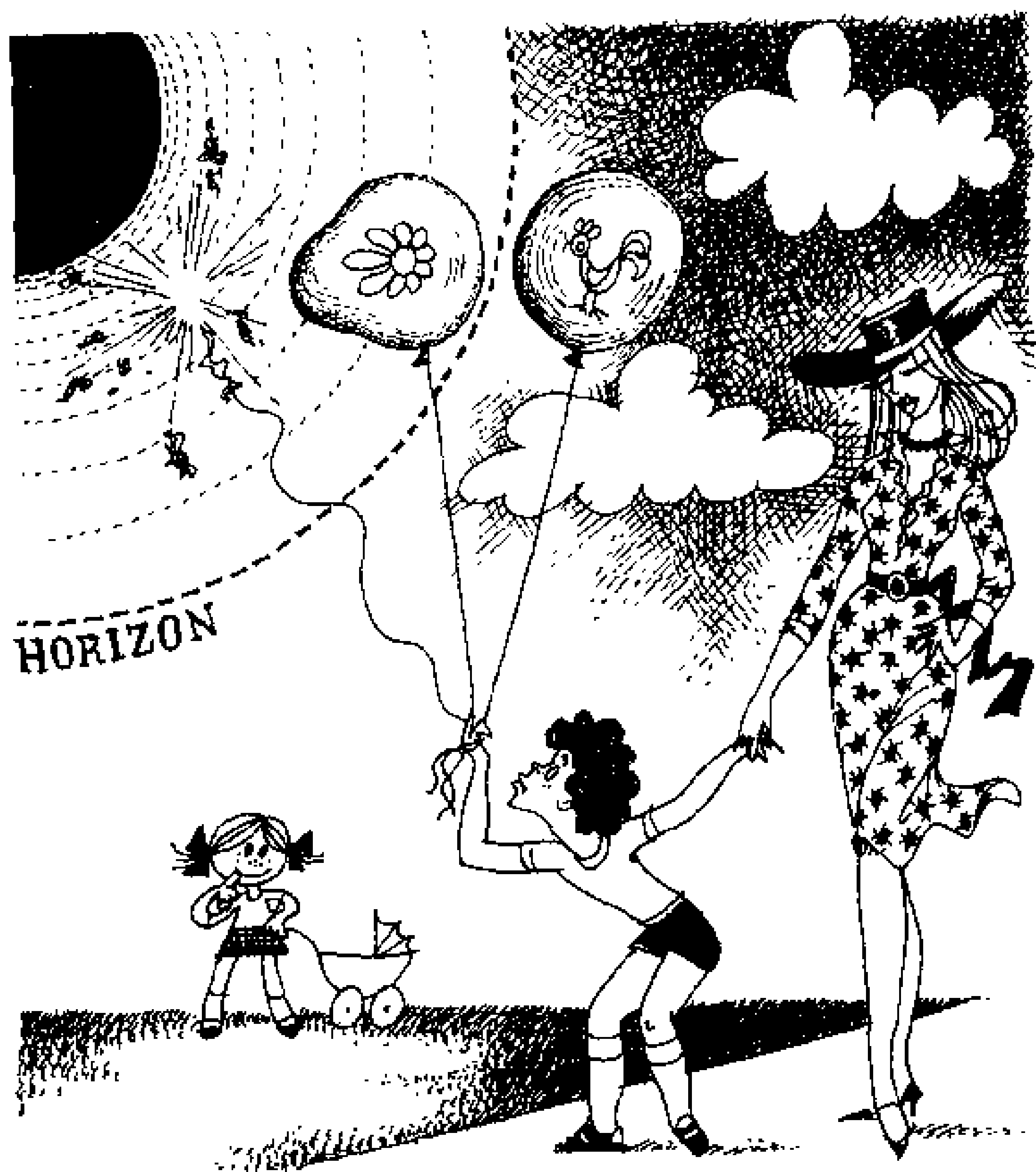
我们讨论这个奇异的假想实验，目的是为了阐明黑洞内部基本现象的本质特征：潮汐力无限制地增长，以奇点为终结。这些为什么如此重要呢？

事实上，奇点附近巨大的潮汐力使得我们必须修改在不大极端条件下所建立起来的物理定律。有一些内容将在本书的第二部分中给出概括性的描述。暂时我们只需要指出在奇点处不仅时间和空间强烈地弯曲，而且它们失去了连续性，分裂成为相互分离而不能再分割的间隔，或者说是量子。在这里我们不再深入探讨下去，这是因为：第一，读者可能已经厌烦了去尝试领会这种非传统的东西；第二，理论家们也不十分清楚在黑洞内部所发生的事。这确实是引力科学的前沿。

然而，目前我们已知的关于黑洞内部的知识是非常令人感兴趣的。

这部分知识是世界上许多国家的理论家们共同努力、专心致志的结果。

最大的困难之一还是弄清楚在实际而非理想的情形下黑



洞内部究竟发生了什么。真实和理想的情形之间的差别是什么呢？为了简化需要求解的方程，理论家们就借助于理想化。例如，假定正在收缩的恒星是完全球对称的，甚至连对球形极小的偏离也没有。与一般情形相比，这种理想化问题的方程极其简单。我们能够成功地求解这些方程而且分析由此产生的球形黑洞的内部。尽管获得了这个解，物理学家仍然花了几十年时间去完全弄懂黑洞内部的结构。

实际上，任何一个恒星都不可能是理想的球形。在压缩过程中对球形的偏离会越来越大。在这种情况下会发生什么事情呢？直接求解的方法在这里无能为力。一般解根本就无法得到。寻找答案需要真正数学上的敏锐。

不管什么时候阅读这类文章，总是会出现一个相同而从未被回答的问题：这样一个非正统解决问题的途径到底是怎么想出来的？行星运动的发现者约翰内斯·开普勒(Johannes Kepler)非常简洁地表述了这个问题。他说，在他看来，那些认识天体现象意义的人几乎像这些现象本身一样神秘。

第一个成就是英国理论物理学家罗杰·彭罗斯获得的。他证明了当一个真实的非球形天体在压缩到黑洞内部后，奇点的出现不可避免，也就是说，压缩形成了一个无限大引力潮汐力区域。

彭罗斯证明了在黑洞中避免形成奇点的不可能性本质上隐含于这个事实：把整个地球表面在纸上映射为地图而地球表面上所有相邻的点在地图上仍保持为相邻的点，这是不可能做到的。你将会想起德兹涅夫角(Cape Dezhnev)和阿拉斯加(Alaska)实际上相当近，但是在地图上经常显示出它们处在相反的两端。彭罗斯正是采用了这个熟知的事实优美地简

化了他的证明。

但是任何掉进真实黑洞中的物体也要掉进奇点是同样不可避免的吗？相当多的理论家们试图解决这个问题。70年代中期，我们和安德列·多罗斯柯维奇一起开始着手工作，后来来自土耳其的格塞尔（Gürsel）和美国的桑德伯格（Sandberg）也加入其中。今天这些人和其他许多专家们已经在很大程度上彻底研究了这个问题：可以证明掉进奇点是不可避免的。

我想提醒读者，黑洞外部的观测者对于黑洞内部的事件只有“理论上”的认识。他不可能从黑洞视界下面获得任何信息或信号。目前在美国生活和工作的著名印度物理学家、诺贝尔奖金获得者萨勃拉赫马尼·钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）非常富有诗意地描述了这种情形。

> 对我来说，在考虑与视界有关的现象和穿越它们进行通讯的不可能性之时，我常常回想起50年前在印度时所学的一个源于大自然的寓言。
>
> 这个题为“并未丧失，但已先行”的寓言与在池塘底产卵的蜻蜓幼虫有关。对这些幼虫来说，它们在到达蛹的阶段时，穿过池塘表面而从不返回，它们将来会怎么样真是一个永恒的秘密。每一个幼虫，在接近蛹的阶段并感到不得不升到池塘表面时，它答应回来告诉那些仍留在塘底的幼虫实际发生的事，以证实或否定来自青蛙的传闻：当一个幼虫在它们世界的另一

边出现时，它变成一个具有细长身体和彩虹色翅膀的极其美丽的生物。但是作为一个完全成型的蜻蜓从池塘表面出现之后，无论尝试多少次或盘旋多长时间它都不能穿越这个表面。有关幼虫的历史书籍没有任何记载，表明曾经有一个返回来告诉它们在它穿过世界的穹顶时发生了什么事，这个寓言以鸣叫声结束：

你们之中就没有一个会发发慈悲，
对那些留下来的伙伴，
揭开这个秘密？

没什么比黑洞更简单，没什么比它更复杂

我们已经认识了黑洞物理学，知道了在黑洞周围会发生什么并预期在黑洞内部会发生什么。读者大概会同意黑洞是十分异常的物体，与以前已知的任何东西都不相同。它们既不是传统词义下的物体，也不是辐射。它们在时间和空间中形成洞，是由在快速增长的引力场中空间极其强烈地弯曲和时间流动速度的变化所引起的。

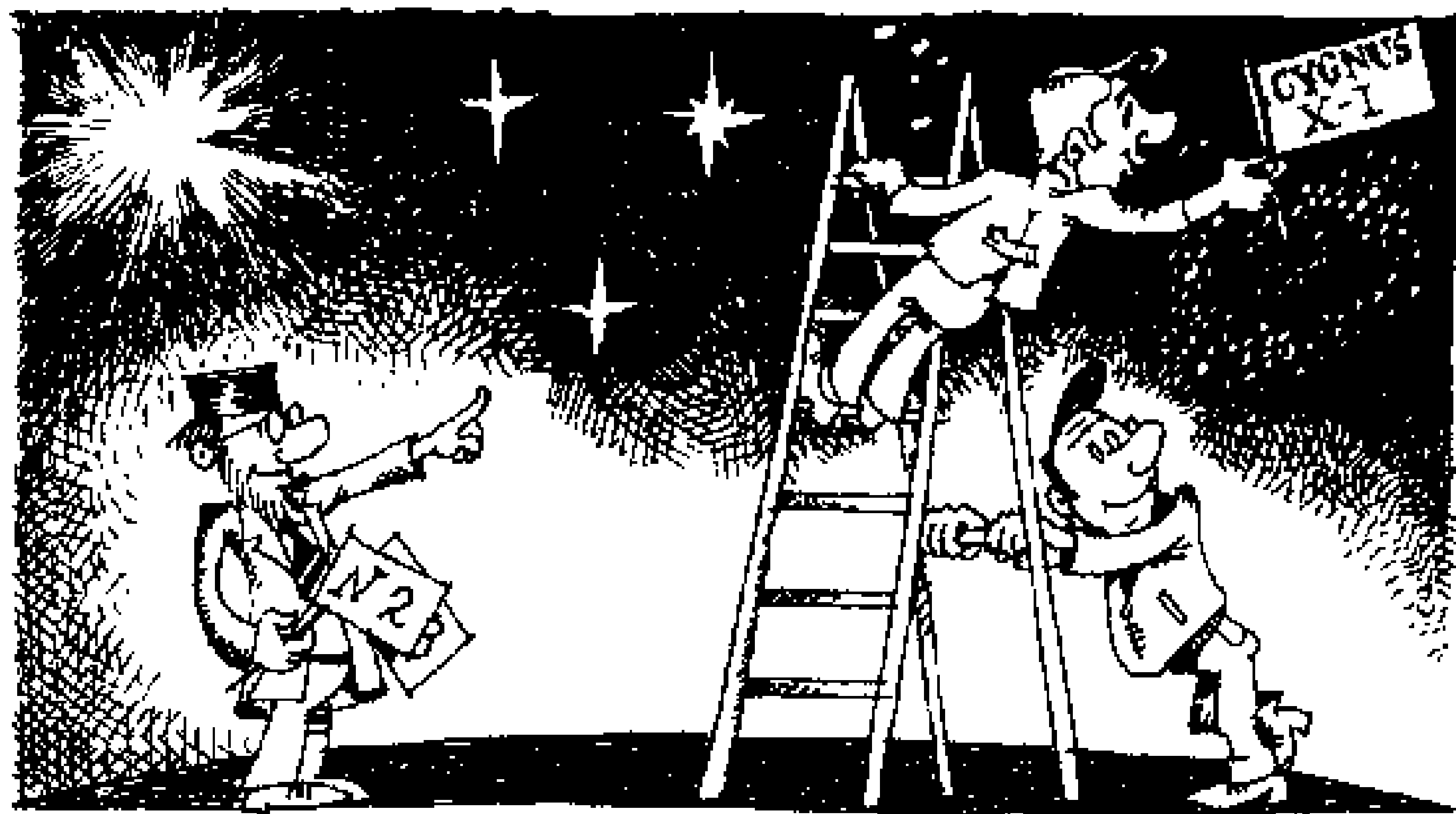
同时，在前一节我们已经证明了黑洞在一定的意义上是非常简单的天体。它们的性质完全与坍缩物质的性质无关，与物质结构、它的原子结构、其中物理场的所有复杂性无关，与物质是否是氢或是铁等等无关。当一个黑洞形成时，对于一个外部观测者而言，好像经历坍缩物体的所有性质都消失了，它们对黑洞的边界和外部空间中的任何其他事物毫无影响，全部所剩下的只有引力场，它仅由两个参数描述：质量和转动（我们已经声明总电荷不代表天体的特征）。它们决定了

黑洞的形状、大小和所有其他性质。这样我们就能相当肯定地说没有什么能比一个黑洞更简单。与之相比,人体简直复杂无比,绝不可能像黑洞那样仅由两个参数来刻画。

黑洞这一非凡的简单性曾经使美国物理学家克普·森恩(Kip Thorne)提出如下意见:"它犹如能够从一位女士的体重和头发颜色推断出她的每一个特征。"

可是,也没有任何东西能比一个黑洞更为复杂。当一个黑洞形成时,人类的想像力的确不能够充分理解空间和时间的弯曲程度。黑洞物理学的研究扩展了时间和空间基本性质方面的知识。稍后我们将看到在黑洞附近发生的量子过程,它揭示了所谓的物理真空最难以理解的结构。在黑洞内部(奇点附近)甚至有更为(灾难性的)强大的量子过程发生。实验上发现自然界中的黑洞对于科学是至关重要的。我们将能够研究支配强引力场中时空性质的新定律以及支配极端条件下物质运动的新定律。可以说,黑洞是通往一个研究物理世界新的且非常宽广的领域之门。

可是,黑洞能被看作为一个实体吗?我们已经提到过迄今为止任何人工产生黑洞的希望都不存在。幸运的是,现在已经认识到在宇宙中黑洞能以天然的方式形成。



4. 搜寻黑洞

它们必定存在

天文学家对恒星演化的知识导致一个不可避免的结论：大质量天体在寿命终止的时候必定转化为黑洞。这个演化是怎样进行的？为什么结论如此肯定？

一个类似于我们太阳的正常恒星其物质受到两个相反的力：试图把物质向中心点挤压的引力和使得恒星趋于膨胀的热气体压力。当这两个力相等时恒星维持稳定的状态。可是，热恒星不断地从它的表面发射能量，如果这个损失得不到补偿的话，这个恒星将辐射掉它的热能并开始收缩。然而这个收缩没有发生，这是因为在温度足够高的中心区域核聚变反应释放了巨大的能量。这个核"燃烧"首先转化氢，其次是

氦，然后是碳、氧等重元素。核反应构成了恒星向太空所发射能量的来源。

随着时间的推移，恒星中贮存的核燃料用完了。核燃烧的持续时间（恒星一生中的活跃时期）是由能量损失（变成辐射）率和核燃料的贮备共同决定的。两者都与恒星的质量有关。恒星的寿命是其质量的函数。接近太阳质量的恒星大约生存 100 亿年。更大质量的恒星其寿命更短。因此，3 倍太阳质量的恒星生存 10 亿年，而 10 倍太阳质量的恒星只能生存 1 亿年。

当核燃料贮备耗尽时，恒星继续通过辐射损失能量并逐渐收缩。如果恒星质量不超过 1.2 倍的太阳质量，那么当它的半径减小到几千公里时收缩就会停下来。恒星物质密度能够达到 10^9 克/立方厘米。这样的恒星叫做白矮星。它们是天文学家所熟悉的天体。

一旦白矮星形成了，这颗星继续冷却，但是它的半径几乎保持不变。阻止白矮星进一步收缩的气体压力由量子力维持，它出现在这颗星的等离子物质中充分紧密挤压的电子之间。在恒星条件下，这个压力完全与物质的温度无关。所以，白矮星能够完全冷却并变成一颗不再改变大小的黑矮星。

如果恒星质量大于 1.2 倍太阳质量，收缩使密度增加到大于 10^9 克/立方厘米。在这个密度下，某些吸收大量能量的核反应开始起作用。这种吸收破坏了引力和压力的平衡，然后恒星开始灾难性的收缩。

收缩的一个可能结局是我们观测上视为超新星爆发的核爆炸。这颗星抛去了它的外壳后转变成一颗所谓的中子星。引力的压缩是如此之强，使得这颗星中心的密度变得可以与

原子核的密度相比,即 10^{14}克/立方厘米～10^{15}克/立方厘米。

中子星好像是一个直径大约 10 公里的"原子核"。在这颗星中核子(中子)相互挤压得非常紧密。如果中子星的质量不超过 2 倍太阳质量,中子气体通过量子力能够抵抗星体的进一步压缩。这是该星冷却后的最终状态。实际上鉴于地球上的典型情形,"冷却的"中子星的概念有些不太合适。确实,即使气体的温度达到数亿度,热并不能影响这样一个高密度气体的压强。正是由于这个理由,虽然天体物理学家常常把中子星叫做冷的星,但是该星的中心温度可能会达到几亿度,表面温度也会有 100 万度。

寻找中子星的过程漫长而不成功。这是很容易理解的。一个直径只有 10 公里、表面温度为 100 万度的恒星,假如它离我们足够近的话,也只有通过最大的望远镜才能观测到。中子星的发光表面的确是非常之小,它们发出的可见光一般只有太阳光的百万分之一。即使我们真的观测到一颗中子星,我们仍然不知道怎样把它与普通暗星区别开来。

我们尝试过根据中子星对邻近恒星产生的引力效应来加以认证。在一个密近双星系统中辨认出暗中子星是不可能的,因为它的光线被伴星明亮的辐射所淹没。可是,中子星的质量大多与普通恒星相同。天文学家们开始寻找带有一颗正常质量但是光度很低的恒星的双星。这些尝试也被证明是不成功的。

在从理论上作出预言 33 年之后,中子星于 1967 年相当偶然地被安东尼·赫威士(Antony Hewish)领导的一个英国天文学家小组发现了。人们发现靠近中子星(它们都有非常强的磁场)的表面存在发射方向明确的射电波束的活动区域。

它同中子星的表面一起旋转，它的射电波束起到一个旋转探照灯的作用。这个波束在天空中扫描，当它碰到地球时，我们观测到以相等的间隔到达的射电波束的闪光，这个间隔对应于中子星的自转周期。这些闪光就是英国天文学家们所报告的脉冲。

脉冲星(这是给这些新宇宙天体起的名字)射电辐射的闪光具有非常短的周期(大约 1 秒或更短)。这个自转周期决定了星体的直径至多不过几十公里。的确，一个直径1 000公里的恒星(例如白矮星)以这样快的速度转动将会被离心力撕成碎块，这样快的转动速度低于使一个小中子星碎裂的极限转速，从而证明脉冲星就是中子星。

脉冲星是一颗质量不太大的恒星的活跃的一生中的最后阶段，它的质量小于两个太阳质量。

在现实的宇宙中，中子星被星际气体所包围。气体可以落向中子星，在撞击它的表面时对它加热并发出 X 射线。如果一个中子星处在双星系统中而它的(正常)伴星的大气泄漏气体，这些气体可以到达中子星的引力场。在此情况下，气体流量和 X 射线发射强度都变得特别高。这样的 X 射线脉冲星也在双星系统中被发现了。

这样就毫无疑问地证明了中子星的存在。可是，计算表明，在恒星的核燃料已经耗尽，星体已经收缩，脱落外壳的可能过程已经完成之后，如果该恒星的质量仍然超过临界值(大约两个太阳质量)的话，那么在超密核物质中的巨大压力就变得不足以抵抗进一步的收缩，最后不可避免地要转变成一个黑洞。

可是，有时候还存在一种不同的意见。在大质量恒星演

化的最后阶段，它们可以把大部分质量喷射到太空中去，而剩下的部分质量在临界值以下，因此转变成白矮星或者中子星。事实上，大多数天文学家渐渐抱有这样的看法，认为这种演化途径极不自然也非常不可能。从而我们得出结论，在大质量恒星演化的最后阶段不可避免地会产生黑洞。

在宇宙中可能存在非恒星起源的黑洞吗？答案极可能是肯定的。本书稍后将会叙述这些非常有趣和不寻常的可能性。实际上，宇宙中至少存在一种其他类型的黑洞，那就是星系中心的超巨黑洞。天文学家已经发现了一些恒星级黑洞和一些超巨黑洞。历史上首先发现的是恒星级黑洞。为此我们推迟非恒星黑洞的讨论而转去寻找恒星级的黑洞。

如何寻找黑洞

显然，在 60 年代以前天文学家们没有试图“认真”地搜寻中子星或黑洞。人们私下认为这些天体太稀奇古怪，很可能是理论家们痴心妄想的产物，宁愿避免谈论它们。有时候人们含含糊糊地用这样的议论提起它们：是的，它们也许会形成，但这种事很可能从来就没发生过，不管怎么样，即使它们存在，我们也不能够探测。

这样异乎寻常的天体破坏了天文学家们习惯的宇宙图像。就黑洞而言，大多数天文学家公开表示怀疑。在拒绝相信黑洞真实性的那些人中就有英国天文学家阿瑟·爱丁顿(Arthur Eddington)(1882—1944)。他走上天文学的道路颇有典型性。他一开始是格林尼治天文台的一位实测天文学家，花了大量的时间于恒星运动统计学的研究。1914 年他升任为剑桥大学天文台台长，致力于研究当时作为一个成熟的

科学领域而出现的天体物理学。

他对天体物理学的贡献之大无论怎么评价都不过分。他是第一个识别决定恒星内部结构主要过程的人,他提出了一个极其重要的思想:来自恒星深处的能量主要是由光通过不透明气体的缓慢渗透来传输的,而不是像加热器上蒸锅中的开水那样依靠热传导。早在1916年,那时的人们对核反应没有任何概念,爱丁顿就能够证明星体缓慢收缩和同时发热并不能够构成恒星的能源(这是当时起支配作用的教条),但是必定存在某种尚不为人们所知的爱丁顿称之为“亚原子”的物质转换。他研究恒星的脉动、恒星大气的结构和许多其他的天体物理学问题。

爱丁顿是最先充分理解广义相对论的新奇和深远意义的人之一。他于1919年领导了一个考察队第一次在日全食期间测量了光线在太阳引力场中的弯曲,结果与爱因斯坦理论的预言完全吻合。爱丁顿的科学成就得到了充分的承认:他被选为伦敦皇家天文学会主席、伦敦物理学会主席、国际天文学会主席以及其他许多学会的成员,包括当选为苏联科学院外籍通讯院士。

就是这样一个人,他不能够接受足够大质量的恒星的最终命运是失去稳定性和产生灾难性的压缩。钱德拉塞卡回想起:爱丁顿认为恒星坍缩,其中的引力变得如此之强以至辐射被阻断而形成黑洞是不可能的。

钱德拉塞卡相信这样一位权威天文学家持如此鲜明的否定态度使相对论天体物理学的发展延迟了几十年。怎么会发生这样的事情呢?为什么一位如此进步和对每件新事物如此敏感的科学家,却不能够理解和欣赏这样一个重要的概念呢?

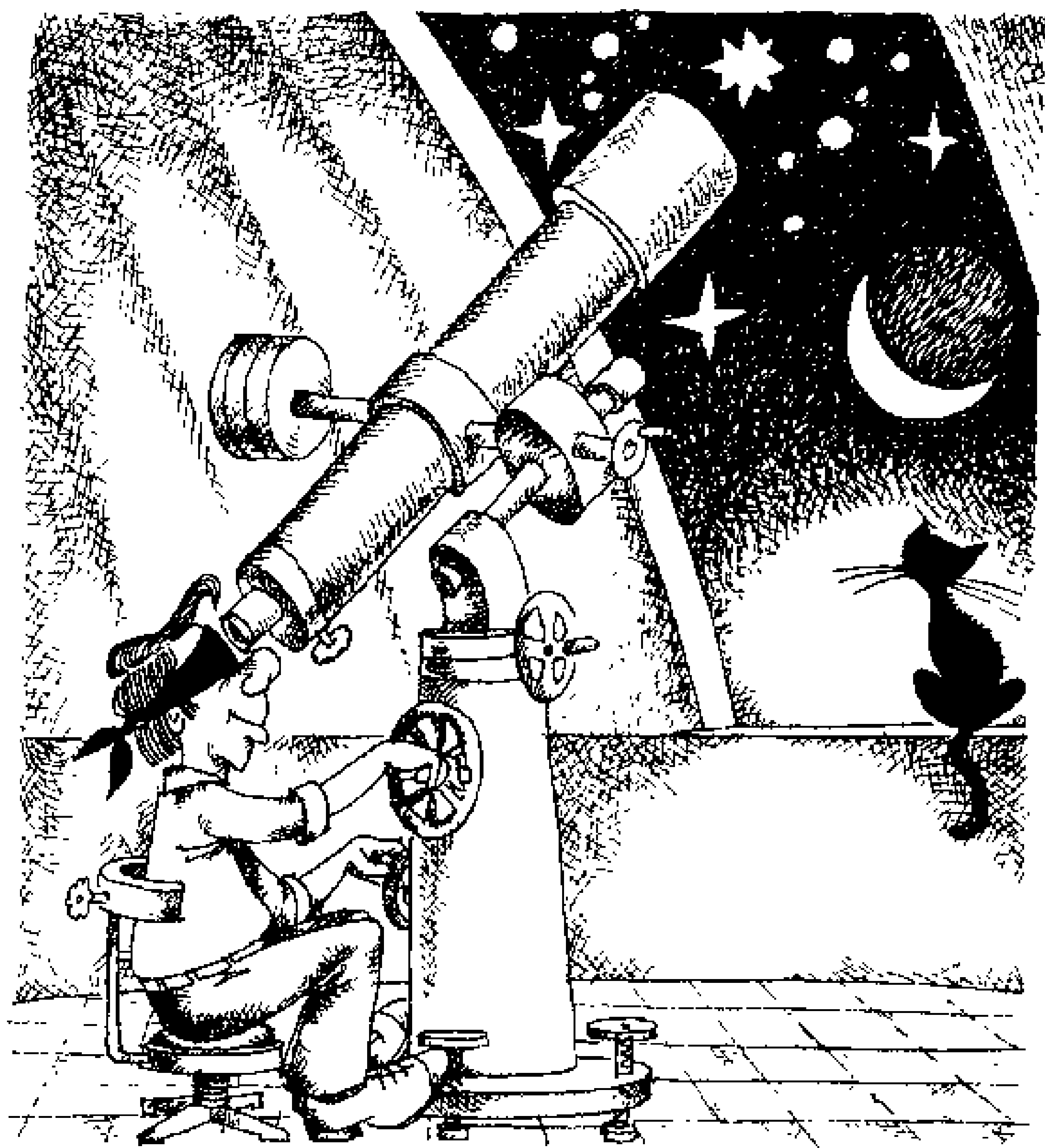
苏联天体物理学家伊奥西夫·史克洛夫斯基(Iosif Shklovsky)认为爱丁顿过于热爱恒星,对此他奉献了整个一生(一个独身男人,值得尊敬的老单身汉的一生)。这个说法多半是正确的。他设法发展了恒星的平衡和稳定性理论,却又不得不面对这个令人不愉快的灾难:相对论性的坍缩。爱丁顿的立场是:这简直不可能!大自然一定会"发明"一种补救措施来保护宇宙的物质免于这样可怜的命运!史克洛夫斯基有充分的理由得出结论:"谚语说缺点是优点的延伸,其中富含智慧。"

甚至在更晚得多的50年代末,那时我是莫斯科大学天文系的一名学生,没有一位教授曾经提起过当大质量恒星死亡时结果是什么。我并不排除死亡的概念在这里可能起了作用,在谈话中通常避免这个词。在合乎礼仪的社会中进行讨论,恒星死亡是一种"被禁止的话题"。

此外,黑洞的奇异性质和广义相对论这门学科(老一辈的天文学家都不重视它)的复杂性也都是消极因素。

60年代的许多发现迫使天文界改变了它对宇宙中大量过程的态度。这些发现就是活动星系核和类星体,后者显示出其发射功率竟然大于亿万个恒星的功率,还有从宇宙开始膨胀的最初时刻残留下的原始宇宙微波背景。有鉴于这些成就,我们到此停顿下来而不能够发现中子星和黑洞反而变得非常奇怪。最后,正如我们已经提到的,中子星(脉冲星)被发现了。现在轮到黑洞的发现。但是怎样去发现?如果它们既不发光也不反射光线的话,我们怎样才能探测到它们?

事实上,天文学家对于无辐射天体,例如暗尘埃星云已经有一些研究经验。它们显现为恒星或发光气体星云背景上的



黑点。可是，尘埃星云是具有巨大尺度的天体，而由恒星起源的黑洞的直径只有10公里。黑洞产生于大质量恒星，离我们最近的一个黑洞必定位于几十光年的距离之外。相应地，这个黑洞的可见角直径的大小应当是大约0.000000001角秒，探测这样大小的一个黑点是绝对不可能的。

一个黑洞必定使经过它附近的光线弯曲。在某种意义上

黑洞像是一个透镜。为了使这个效应显而易见，光源(一个更加遥远的恒星)、黑洞和观测者三者相互对准必须达到几乎精确地成为直线的程度，以至于依靠偶然来实现这种安排根本毫无希望。如果在宇宙中有许多黑洞，就有可能观测到这种效应。在第4章末将提到这种可能性。

剩下来的可能性就是利用这样的事实：黑洞质量与大质量恒星相同，但是与后者的区别在于它们根本不发光。这正是苏联天体物理学家古塞诺夫(Guseinov)和察尔多维奇于1964年提出的方法。他们建议在双星系统中搜寻黑洞。假定在某些双星系统中一颗恒星是正常的发光恒星而它的伴星是一个黑洞，这两个天体必定绕它们共同的质心转动。可是，黑洞是看不见的，结果好像这个可见的伴星绕着"不存在的东西"转动。

顺便提一下，他们搜寻黑洞的方法在1784年约翰·米歇尔预言黑洞存在的那篇论文中已经提出来了。他写道：

> ……因为它们的光线不能够到达我们这里……我们从视觉上就得不到任何信息，然而，如果有任何其他发光天体碰巧绕着它们转动，我们多半仍有可能在一定的程度上从这些转动天体的运动推断出中心天体的存在，因为它可以为这些转动天体的一些不规则性表现提供线索……

新方法就是过去那个早已被人们遗忘的建议，难道不是吗？

现在让我们回到20世纪。当然，任何望远镜从这样遥远

的距离都不能分辨恒星的轨道运动。(原注：然而下一世纪空间天文学的新方法可能观测到这样的运动。)可是，我们可以借助于天体物理学中已经广泛使用的一种特殊方法：当恒星沿着它的轨道正在向我们运动时，它的光谱线向蓝端移动；而它远离我们运动时，光谱线向红端移动。天文学家熟悉的所谓分光双星就是由上述技术发现的。当由普通恒星组成的分光双星中一颗正在向我们运动而另一颗远离我们时，谱线向两端移动。经常性地，我们观测到只有一颗恒星光谱线的周期性位移，却找不到伴星的谱线。表面上，在这种情况下应该怀疑伴星可能是黑洞。可是，其中大多数情形的解释却很平凡：第二颗恒星发光但是比第一颗要弱得多，它的光线被它明亮伴星的辐射所淹没，所以我们看不见它。

有一些分光双星，根据可见子星的运动计算表明，其不可见伴星的质量大于可见子星的质量。苏联天文学家们提议搜寻这种分光双星中已熄灭的恒星。因为这意味着这个不可见伴星不是一颗已停止发光的普通恒星。确实，如果这颗伴星是一个普通恒星的话，由于它的质量更大，它在两者之中应该更亮，从而不可能看不见。

可是，这个消失的恒星可能是一颗白矮星或中子星。为了在确实熄灭的恒星中辨认出黑洞，必须证明这颗不可见伴星的质量超过临界值(2 倍太阳质量)。我们已经提到过白矮星的质量不能大于 1.2 倍太阳质量，而中子星的质量不能大于 2 倍太阳质量。因此，如果那个消失恒星的质量在临界质量以上，譬如说等于 5 个太阳质量，它只可能是一个黑洞。

遵循这些方法，苏联和美国先后展开了在分光双星中搜寻黑洞的工作。结果证明这些尝试是不成功的。在所有"可

疑"的分光双星中伴星的不可见性都可以用传统的方式予以解释,而无须借助于黑洞假设。上面提出的搜寻方法过于模棱两可,因为通过间接的方法所发现的"黑"几乎总是有另一种解释。事实上,"不可见性"只能表示某物存在的证据不足。它听起来有点像一个与论文题目有关的老掉牙的笑话:"在考古挖掘现场未发现电线杆和电线作为古代文明时期无线电通讯发展的一个证据。"

人们还发现上面的方法即使在原则上也几乎不能证明是成功的。考虑到在密近双星中恒星演化的很特殊的行为,它注定是这样。也就是说,在演化过程中气体从一个伴星流向另一个伴星,以至于原来较大质量的恒星在坍缩过程中向较小质量的恒星传送一部分质量,最后发现可见星的质量比新生黑洞的质量还大。在这种类型的双星中,人们不能够确定为什么伴星是不可见的:它是一颗亮度小于对方的普通恒星(由于质量较小),或是一颗已熄灭的恒星,甚至可能是一个黑洞。

有必要寻找这样的物理现象,其中黑洞的作用是积极而明确的。这个现象已经找到:气体在黑洞引力场中的下落。

在星际空间中已证认出有巨大的气体星云。如果黑洞处在这样的星云之中,气体将在它的引力场中下落。此外,气体携带有磁场,以至于下落伴随有湍流出现。当气体下落时,磁场能量必定转化为热能。在磁场中运动的已加热的电子发射电磁波。在黑洞的视界,广义相对论效应开始起作用。部分辐射被黑洞捕获。远处观测者记录的大部分辐射是从离中心几个引力半径距离处发射的。就这样在掉进黑洞之前的旅途中,热气体把能量辐射到周围的空间之中。这个辐射能足以

证认距离遥远的黑洞吗?

辐射总量(天文学家称之为光度)是下落气体量的函数。吸积在黑洞上的气体的光度在典型的星际环境中与正常恒星而不是异常明亮恒星的光度星级相同。这意味着用这种方法证认黑洞是非常困难的,它们隐藏在银河系的无数暗星之中。实际上,向黑洞下落气体的湍动引起亮度的快速振荡,闪光持续几万分之一秒到几百分之一秒。

用刚才的方法寻找黑洞的建议是苏联天体物理学家施瓦茨曼(Schwarzman)于20世纪60年代末提出的。他和他的同事们在苏联科学院专用天体物理台研制了叫做“亮度变化纳秒脉冲多路分析仪”(它的俄语首字母缩写词MANIA——狂热,结果证明有其象征性)的系列实验仪器。他们年复一年地献身于设计、制造和调节仪器的工作,然后是试验观测,最终是搜寻黑洞。施瓦茨曼带着几乎疯狂的决心沿着这条实验家之路前进。在此期间,他对若干天体进行了有趣的观测。唉!在这次搜寻中还是没有发现黑洞。

已经证认了一个黑洞吗

寻找黑洞的另一条途径是在1966年提出的。为了把它弄清楚,我们先来回答下面的问题。落向黑洞气体的光度相对较低,为什么?

关键在于星际气体的密度很低,以至于它掉进黑洞的数量很少。在银河系中是否存在这样的条件,其中流向黑洞的气体比正常情况下多得多?

是的,这样的条件是可能的。例如,如果在一个相互很接近的密近双星中,其中一个子星是正常的巨星,而黑洞是它的

伴星，上面的条件就能实现。在这种情况下，有强大的气体流从正常恒星的包层流向黑洞伴星的引力场之中。在论及分光双星中的 X 射线脉冲星时已经讨论过这个过程。

在这样的双星中，气体不能够简单地落向黑洞：轨道运动使它参与旋转并环绕黑洞形成一个盘。气体层之间的摩擦把气体加热到 10^7 度(甚至在它掉进黑洞之前)。被加热到这种温度的气体发射出 X 射线。

我们得出结论：黑洞必须从密近双星系统中发现的 X 射线源之中寻找，中子星也是如此。这个预言是察尔多维奇教授和我于 1966 年提出的。1967 年，史克洛夫斯基也系统地阐述了这个预言，他描绘了 X 射线双星演化的一幅详尽的天体物理图像。

为了在天空中搜寻 X 射线源，必须把 X 射线望远镜放到大气层之外。如果观测时间比较长，望远镜必须安装在卫星上(火箭的飞行时间非常短)。1972 年，在乌呼鲁(UHURU)卫星上安装的这种望远镜从几个双星系统中探测出若干 X 射线源。然后，人们使用安装在卫星和载有宇航员的宇宙飞船之上的仪器对这些射线源进行了仔细的研究。苏联就有这样的卫星和飞船。

X 射线天文学时代就这样诞生了。这门激动人心的科学分支需要一本专著或几本书来阐述，但在这里我们把注意力集中于双星系统中的 X 射线源。一些已发现源的亮度以大约一秒钟的不变周期变化。这些肯定不是黑洞，它们是带有磁场的旋转的中子星，其磁极与恒星转动轴不重合。气体沿着磁力线落向磁极，产生 X 射线的定向辐射。自转把这些天体转变成旋转的 X 射线“探照灯”。可是，据我们所知，黑洞

没有表面上的活动斑点，而且不能够产生“探照灯效应”。当黑洞附近气体盘中的热气体块，在内区转动时也能够产生周期性的闪光。可是，因为这些气体块并不是刚性地固定于任何旋转体之上，摩擦迫使气体块向接近黑洞的方向运动（转动周期相应变小），所以闪光的周期必定有相当快的变化。

因此，黑洞必定存在于非脉冲星双星系统内的 X 射线源之中。首先要注意这些源不可能是普通恒星。的确，把气体加热到足以发射 X 射线的温度，气体在其中运动的引力场必定非常强。只有在致密的（高度收缩的）“死亡”恒星——白矮星、中子星和黑洞附近才可能发现这样的场。怎样才能在这些“死亡”恒星之中挑选出黑洞呢？

我们知道有一个可靠的标准就是测量质量。如果一个“死亡”恒星的质量在 2 个太阳质量以上，这个恒星就是黑洞。质量可以根据双星系统中恒星轨道运动的参数求出来。通过分析确定至少有一个已证认的双星 X 射线源，它的质量充分地大于临界值。这个源在天鹅座，叫做天鹅 X-1。

在这个双星系统中，正常的可见恒星是一个大约 20 个太阳质量的大质量恒星。“死亡”恒星的附近发射 X 射线，它的质量大约是 10 个太阳质量。这个值显著地高于临界值。最近大量的研究改善了这个结果的可靠性。因此，我们可以很有把握地说，宇宙中第一个黑洞已经发现，这个黑洞就在包含天鹅 X-1 的双星系统中。

我们来仔细看一看在这个系统之中发生的过程。它的子星以 5.6 天为周期绕公共质心公转。大约 10 个太阳质量的黑洞从大约 20 个太阳质量的“正常”巨星的大气中吸取气体。轨道运动迫使气体绕黑洞盘旋，离心力和引力使气体变成一

个扁平的盘。

由于邻层之间的摩擦,围绕黑洞流动的气体慢慢变成指向中心的螺旋形。向心运动的速度远小于轨道运动的速度。气体包到达离黑洞最近、盘最里面的边缘要花一个月的时间。正如我们所知道的,这里的轨道运动变得不稳定而且气体向黑洞中掉落。

在整个航程中摩擦持续不断地加热气体:气体的温度在外层只有几万度,而在内层它达到 1 000 万度以上。气体 X 射线的总光度是太阳(在所有频谱区的)光度的好几千倍。在地球上所观测的 X 射线辐射的主要部分来自于盘最里面的部分,这个区域的半径不超过 200 公里。黑洞的大小大约是 30 公里。

有更重要的证据表明来自天鹅 X-1 的 X 射线辐射是从接近黑洞的一个非常小的区域中发射出来的,那就是发现了信号在几千分之一秒时间内极快地随机振荡。如果发射它的天体更大一些,它的亮度就不可能变化如此之快。

这个不寻常的 X 射线源位于离地球大约 6 000 光年距离的地方。

发现天鹅 X-1 的 X 射线源已有很多年了。现在人们已经对它作了非常全面、细致的观测研究。那么为什么天文学家有时小心地宣布“可能”发现了一个黑洞而不向前更进一步呢?

让我引用两位美国专家勃兰德福特(Blandford)和森恩的话:

如果这是常规的情况,天文学家们将会自

> 信地接受这个结果。但是,因为人类对黑洞的第一次发现的结果处于岌岌可危的状态,也因为以前有过的结论有时候由于忽视了系统误差而最终被推翻,所以天文学家们现在很小心谨慎。除非发现另外的、独立的和确凿的证据——一个肯定的而不是像"它能是别的东西吗?"这样带消极否定性质的证据——他们不愿意下结论说天鹅 X-1 肯定是一个黑洞。

自第一个黑洞候选者天鹅 X-1 发现以来,几乎 30 年过去了,已经有了一些新的黑洞候选者。经常提到的恒星级黑洞可能的候选者总数大约有 20 个。它们全都是双星系统中的 X 射线源。美国天文学家米切尔·贝格曼(Mitchell Begelman)和英国天文学家马丁·里斯于 1996 年总结目前的状态如下:"在我们的星系中有强有力的证据表明存在黑洞,它们是大质量恒星死亡时形成的,每一个黑洞的质量是太阳质量的几倍。"现在大多数专家都同意这一明晰的结论。

在我们银河系中有多少个黑洞呢?是否有遇到它们中的一个而掉进深渊的危险性呢?

准确地回答第一个问题是有困难的,这是因为我们不知道大质量恒星在坍缩期间被热核爆炸完全摧毁的部分是多少,还有多少成为能收缩成黑洞的质量充分大的核。天文学家相信银河系肯定包含有至少数百万,或许几十亿个黑洞。

至于第二个问题,读者可能已经有了答案:与大质量死亡恒星偶然碰撞的可能性是零。的确,恒星之间的距离是如此巨大,以至于任何两颗恒星碰撞的可能性小到可以忽略。

与一个远远小于普通恒星的黑洞碰撞的可能性在数量级上还要小得多。除此之外，在银河系的所有恒星中变成黑洞的星只占非常小的比例。

巨型黑洞

迄今为止已经讨论了宇宙中恒星级黑洞的形成。天文学家们有充分的理由预期可能也存在其他类型的黑洞，它们有很不一样的形成历史。

读者已经知道在60年代初就发现了类星射电源（类星体）。这种天体在银河系的边缘外十分遥远之处。它们是极其强大的能量发射体：它们的光度有时超过100个大星系的光度总和！这本身就是非常有趣的。但是当确定了类星体所发射的大部分能量来自于一个直径小于一光年的区域时，天文学家们惊得目瞪口呆。

作为比较，你可以回想一下银河系的大小是10万光年。

类星体的大小是怎样估算出来的呢？类星体难道不是离我们如此遥远以至在任何望远镜里它们看起来就像点状的恒星而无法直接测量它们的大小吗？

两位苏联天文学家，埃甫勒摩夫（Efremov）和沙洛夫（Sharov），以及两个美国人史密斯（Smith）和霍夫雷（Hoffleit）用间接的方法解决了这个问题。他们发现类星体的亮度在不到一年的时间内可以剧烈地变化。因此，类星体的尺度不可能大于一光年。的确，如果不是这样的话，那么从它较远的区域发射的光线比来自较近的部分到达我们这里要晚将近一年。即使类星体的光度剧烈地增长，我们将同时记录来自类星体不同部分不同亮度的信号：来自较近边缘的明亮信号和

来自较远边缘的暗弱信号，后者是在一年之前类星体处于弱光度阶段离开光源的。在我们的仪器中，强光和弱光相互混合(而且不能分开)，以至于在时间延伸的方向上整个类星体的亮度变化变得平滑了，从而看起来变化并不剧烈。

因此，尽管类星体小得令人难以置信(只比太阳系大 1 000 倍)，但它比 10 万亿个太阳还亮！这是完全不可能的——那是天文学家们一致的结论(我清楚地记得一位非常知名的莫斯科天文学家在一个讲坛上讲了这句话，当时整个学术界对于类星体的神秘性感到十分迷惑不解)。可是，这个“不可能”本身是无法接受的，因为天文学家们直接观测到了这个“独角兽”。

紧接着涌现出大量的假设，其中大多数都很异乎寻常。两位杰出的天体物理学家杰夫瑞(Geoffry)和玛格丽特·伯比奇(Margaret Burbidge)当时写道：“……关于理论和观测结果的解释存在这么多相互矛盾的想法，其中至少有百分之九十五肯定是错误的。”

现在已经只剩下一个惟一的候选者，有充分的理由声称类星体“主发动机”的扮演者是一个质量等于几亿个太阳质量的巨型黑洞。这样一个黑洞的直径是 10 亿公里。

在过去的几十年中已经弄清楚了类星体是大星系剧烈活动的辐射核。在它们之中常常显示出存在强烈的气体流。在类星体周围的这个星系的恒星是看不见的，通常是因为它们遥远的距离和与类星体相比具有相对较弱的光度。人们也发现许多星系的核类似于“小型类星体”，并且有时显示出强烈的活动性(气体喷射，亮度变化等等)，虽然与真正的类星体相比它们的强度要小一些，甚至在包括我们银河系在内的相当

来自较远边缘的暗弱信号，后者是在一年之前类星体处于弱光度阶段离开光源的。在我们的仪器中，强光和弱光相互混合(而且不能分开)，以至于在时间延伸的方向上整个类星体的亮度变化变得平滑了，从而看起来变化并不剧烈。

因此，尽管类星体小得令人难以置信(只比太阳系大1000倍)，但它比10万亿个太阳还亮！这是完全不可能的——那是天文学家们一致的结论(我清楚地记得一位非常知名的莫斯科天文学家在一个讲坛上讲了这句话，当时整个学术界对于类星体的神秘性感到十分迷惑不解)。可是，这个“不可能”本身是无法接受的，因为天文学家们直接观测到了这个“独角兽”。

紧接着涌现出大量的假设，其中大多数都很异乎寻常。两位杰出的天体物理学家杰夫瑞(Geoffry)和玛格丽特·伯比奇(Margaret Burbidge)当时写道：“……关于理论和观测结果的解释存在这么多相互矛盾的想法，其中至少有百分之九十五肯定是错误的。”

现在已经只剩下一个惟一的候选者，有充分的理由声称类星体“主发动机”的扮演者是一个质量等于几亿个太阳质量的巨型黑洞。这样一个黑洞的直径是10亿公里。

在过去的几十年中已经弄清楚了类星体是大星系剧烈活动的辐射核。在它们之中常常显示出存在强烈的气体流。在类星体周围的这个星系的恒星是看不见的，通常是因为它们遥远的距离和与类星体相比具有相对较弱的光度。人们也发现许多星系的核类似于“小型类星体”，并且有时显示出强烈的活动性(气体喷射，亮度变化等等)，虽然与真正的类星体相比它们的强度要小一些，甚至在包括我们银河系在内的相当

对一个遥远的观测者来说,黑洞的外观似乎表明它有一个具有一定电导率和机械性质的表面。当然这样的表面并不存在!正如我们已经解释的那样,通过进入黑洞的旅程,观测者可以确定它确实不存在。虽然如此,这个视表面的概念在某些情况下是很有帮助的,就像天球的概念——天体在它上面运动。天球在实用天文学中起到简化的作用。实际上并没有这样的球面,但是这个概念为观测程序设计和天体坐标的计算都提供了便利。

黑洞假想表面的概念——它的"膜"——是由克普·森恩和他的同事引人天体物理学之中的。他们演示了在膜框架中常常能够大大地简化复杂的数学运算。

但还是让我们回到天体物理。

最近天文观测的新方法被用来研究星系的中心区域。在新千年开始的时候,我们几乎可以百分之百地肯定星系中心有巨型黑洞存在。这一领域的进展十分迅速,在不久的将来关于星系核存在巨型黑洞的证据会变得更为丰富。

非常可能确实存在超大质量的黑洞。法国作家居里斯·雷纳德(Jules Renard)曾经说过:"科学家是几乎确信某种事的人。"但是鉴于天文学的具体情况,我将避免下这样的结论并以一句话对这一节进行概括:只有进一步的观测才可能澄清目前的情形。

太初黑洞

在这一小节我要讲一下第三种类型的黑洞。为了要形成黑洞,质量越小,物质压缩后的密度就越高。高密度时产生强大的压力以与收缩相抗衡。比太阳质量小的黑洞在现代宇宙

中是不可能形成的,然而在宇宙膨胀开始时有很高的密度(在本书的第二部将讨论这种情况)。察尔多维奇和我在 1967 年,霍金在 1971 年,都曾设想在宇宙膨胀的早期阶段可以产生黑洞,它们可以有小质量。这样的黑洞称为太初黑洞。为形成太初黑洞需要具备非常特殊的条件。现在不清楚早期宇宙是否存在这些条件。只有天文观测才能回答现代宇宙中是否存在太初黑洞。我们应当如何搜寻太初黑洞呢?

前面提到过一种办法:黑洞能表现为引力透镜。已经发现了由一些具有恒星质量量级的未知天体产生的引力透镜,但是专家们相信这些有不明性质的天体不太可能是太初黑洞。

另一种办法与黑洞周围强引力场中的某种过程有关。我们将在题为"黑洞与量子"的下一章中讨论这些过程。在那里也将讨论搜寻太初黑洞的相应方法。

尽管做了很多努力,迄今为止还没有证据说宇宙中存在太初黑洞。



5. 黑洞和量子

真空有多空?

黑洞在天文界引起激动始于20世纪50年代末和60年代初。许多年过去了,这个神秘之物也相当地清楚了。人们认为大质量恒星的死亡不可避免地产生一个黑洞,而且发现了类星体的中心可能存在一颗超大质量的黑洞。最后,在天鹅座的X射线源中证认了第一颗恒星起源的黑洞。理论物理学家们在黑洞令人迷惑不解的性质之中找到了规律,并且渐渐地习惯了这些引力深渊。黑洞只能吸收物质并增大,它们似乎注定要永远存在下去。

没有任何迹象预示会有一个新的、伟大的发现。虽然如此,这个发现还是到来了,好像一个晴天霹雳,甚至令物理学

老手们感到吃惊。

这个预言就是黑洞不是永恒的！由于在强引力场中发生的量子过程，它们有可能会消失。为了使这个发现的要旨更易于理解，我们从稍远一些的地方出发，讲述其消失经过。

让我们从空的空间——真空开始。对物理学家来说，空的空间根本不空。这并不是一个双关语。很早以前就已经确立了“绝对”虚空，即“空无一物”原则上是不可能的。那么对物理学家而言，空的空间究竟是什么呢？真空是把所有的粒子和所有物理场全部的量子都移去以后所剩下的东西。读者（假如他最近没有更新他的物理图像）可能有这样的看法：那么就没有剩下任何东西。哦，不对，会有某些东西。物理学家说空的空间充满了大量有待诞生的所谓虚的粒子和反粒子。虚粒子根本不能“移去”。在缺乏外场的情况下，也就是说当没有能量传递给它们时，它们不能够转化为实粒子。

粒子反粒子对在空的空间的每一点只出现非常短的时间，此后这两个粒子再次结合并消失，回到其“胚胎”状态。当然，这个简化的语言只能建立所发生量子过程的一个粗糙的图像。存在虚的粒子反粒子对的海洋是很久以前通过直接的物理实验确立的。这儿不再继续作此方面的讨论，否则我们将会离开主题太远。

为了避免不必要的语义双关，物理学家们把空的空间称为真空。我们也将使用这个术语。

一个充分强的或振荡的场（例如电磁场）可以触发真空中的虚粒子转化为实的粒子和反粒子。

在很久以前，理论家和实验家们就对这样的过程产生了兴趣。让我们考虑一个交流场产生实粒子的过程。量子过程

被认为是不寻常的，并经常对常识构成挑战。在讨论交变引力场产生粒子之前，先来看一个力学中的简单例子。它会使我们的讲述更为清楚。

想象一个单摆。它的悬线通过一个滑轮，用卷紧和放松悬线可以改变摆长。推动摆锤，它开始摆动。振动周期只依赖于摆长：摆长越长，振动周期也越长。现在我们非常缓慢地将悬线向上拉动，则摆长减小，周期也减小，但是振动的范围（幅度）增加。我们再缓慢地放长悬线使它达到初始位置，则周期和振幅都恢复到原来的值。如果我们忽略摩擦引起的振动阻尼，振动所携带的能量在终态仍保持未变：它与在改变摆长的整个循环之前相同。可是，有可能以这样的方式来改变摆长使得当摆长回到初值时振幅发生了变化。为了做到这一点，你必须以 2 倍单摆的振动频率拉动悬线。这正是我们在荡秋千时所做的。我们伸腿或提腿保持与秋千运动相一致，使得摆动的幅度不断地增大。当然，如果我们的腿部运动与秋千运动正好“反相”，摆动就会停下来。

谐振器中的电磁波能够以类似的方式“摆动”。谐振器是一个空腔，它具有能反射电磁波的镜壁。如果将电磁波密封在带有镜壁和镜面活塞的空腔之中，我们以 2 倍电磁波的频率来回移动活塞就能够改变波的振幅。通过使活塞运动与波的振荡“同相”可以增大电磁波的振幅，也就是增大了它的强度，而“反相”的活塞运动则使振幅减小。但是，如果活塞随机地运动，平均来说波总是增强，即能量被注入电磁振荡。

现在往我们的谐振器中装入各种可能频率的波。无论活塞怎样运动，总有一种波与它的运动“同相”。这种波的振幅和强度得到了放大。波的强度越大，波所包含的光子（电磁场

的量子)数也就越大。因此,活塞运动改变了谐振器的形状,从而产生了新的光子。

在概略地叙述了这些简单的例子之后,我们回到真空,回到这个具有所有可能虚粒子的海洋。为了简单起见,我们现在将只考虑一种粒子,即虚光子。人们发现了一种与上述谐振器尺度的振荡相类似的过程,在经典物理学中它导致所含振荡(波)的增强,在量子物理学中它引起虚振荡的"放大",即它将虚粒子转化为实粒子。因而,引力场随时间的变化必然产生频率与场的变化时间相对应的光子。一般来说,由于引力场较弱,这些效应是可以忽略的。可是,在强场中的情形大有不同。

另一个例子是:非常强的电场在真空中产生带电粒子对(电子和正电子)。

让我们从简短的离题讨论真空物理学再回到黑洞上来。粒子能够在黑洞附近的真空中产生吗?

是的,它们能够产生。这一点早已为人所知,而且也没有什么耸人听闻之处。因而当一个带电的天体受到压缩并转变成带电黑洞时,它的电场增强到如此程度,以至于产生电子—正电子对。马尔科夫(Markov)和他的学生们研究了这样的过程。事实上,即使没有黑洞,这种过程也是有可能发生的,但是在那种情况下电场必须以某种方式增强到足够高的水平。这个效应根本不是黑洞特有的。

察尔多维奇证明了在一个旋转黑洞的能层中也产生粒子,同时耗去黑洞的一些转动能。这个现象有点像彭罗斯所发现的过程,后者在第三章中有简要的描述。

所有这些过程都是由黑洞周围的场和这些场中产生的变

化所引起的，但是它们既不能使黑洞缩小，也不能够减小允许光、其他辐射或粒子逃逸的区域的尺度。

霍金的发现

英国理论物理学家斯蒂芬·霍金于1974年有一个轰动一时的发现。一本由美国理论物理学家密斯纳(Misner)、森恩和惠勒所著，在这个发现作出以前出版的关于引力的教科书中给出了对霍金工作的描述：

> 在这样的领域中，不仅展示了相当可观的洞察力、深刻性和全面性，而且还有非凡的决心去克服严重的身体障碍，有去寻求和充分理解真理的天赋。

霍金能够证明存在一个由黑洞自身和它的引力场产生粒子的量子过程，这个过程减小黑洞的质量和大小。

乍一看来，这令人感到有些惊讶。的确，当一个黑洞正在形成时，对远处的观测者来说，这个收缩恒星的所有过程很快就慢下来并"冻结起来"，引力场在每一处都变成恒定而不随时间变化。这个场不能产生粒子。可是，如果一个变化的场在黑洞形成期间产生(数目很小的)一些粒子，随着恒星表面接近引力半径，就像所有其他过程一样，这些来自新生黑洞的粒子流很快就会衰亡。霍金的结果实际上陈述了这个结论是错误的，这个流不会完全消失，甚至在黑洞已经形成之后它仍将继续存在。这是否自相矛盾呢？

关键在于黑洞内部的场根本没有冻结。在那里，任何时

间都不变是不可能的，黑洞内部的一切物质都必须运动，向中心下落，就是这个因素导致了霍金发现的那个奇异的过程。读者会想起在正常条件下真空中的虚粒子形成正反粒子对，它们只能存在很短的时间，然后合并并消失。在黑洞的引力场中，以这种方式产生的粒子对中的一个粒子有可能处在视界之下并立即落向中心，而另一个粒子留在视界之外并飞离黑洞进入太空，同时带走黑洞的一部分能量，因而也就是带走了它的一部分质量。

因此，这儿出现了黑洞粒子的量子辐射。实际上，通常这个过程是完全可以忽略的。霍金的计算表明黑洞发射出像普通物体加热到非常低的温度时那样的辐射，例如从 1 个太阳质量的黑洞发出的辐射对应于一千万分之一度的温度。当然，这个辐射小得可以忽略。黑洞所发射光子的波长等于黑洞的大小——10 公里。这个辐射造成的能量损失完全可以忽略。

由于星际空间中稀疏的原子和宇宙中传播的微弱光子流落入黑洞之中，在今天宇宙的实际条件下黑洞所获得的能量远远大于它的辐射所损失的能量。所以，事实上黑洞并未缩小而在增大。黑洞越大，它的辐射温度越低。因此，巨型黑洞的量子辐射是绝对可以忽略的。

黑洞爆炸

在读完前而的几段之后，读者可能会耸耸肩表示难以置信："就是这样一个无关紧要的现象，它怎么能够在物理学家中引起这样一阵惊讶和喜悦呢？"

但事实的确如此。因为在霍金的发现之前，物理学家们

确信黑洞外部的静态引力场不能以任何方式产生粒子。至于黑洞内部可变的场，它对于远处观测者而言是看不见和摸不着的因而能够安全地略去。可是，它是典型的量子过程，一个粒子可以在经典物理学明确禁止它出现的地方出现。例如，当一个粒子的能量不足以越过一个势垒时，这个粒子可以"渗透"方式通过这个势垒。霍金证明了这个量子粒子的性质在黑洞的情形下产生了一个性质全新的效应——黑洞的量子蒸发。先不管外部的影响，只考虑这个效应，黑洞将慢慢地消失，转变成热辐射，在时空中慢慢地缩小。霍金的发现最重要的价值在于黑洞的永恒性已经被否决。

然而，这只是故事的一部分。一个黑洞越小，它的辐射温度就越高。

当黑洞的质量随着蒸发过程而减小时，它的温度增加则因蒸发而加强。当黑洞的质量降到1 000吨时，它的辐射温度增加到 10^{17}度！蒸发变成一种极其强烈的爆炸。这最后的1 000 吨，压缩到一个微小的体积，被黑洞在十分之一秒内辐射掉，更精确地说是爆炸掉。由此，释放的能量相当于 100 万颗百万吨级氢弹的爆炸。这个硕大无比的烟火表演扫除了那个早先似乎是永久性的引力深渊。

当然，这个爆炸可能要度过一段非常长的时期才能发生。计算表明，如果不涉及外部因素，一个恒星质量的黑洞一直蒸发并在经历 10^{66}年的时间之后爆炸。天文学家们在面临这样长的时间跨度时也只好放弃。

尽管如此，在宇宙十分遥远的未来这些过程可能会变得很重要。在本书的下一部分我们还将回到这一点上来。

让我们从黑洞一生中的最后时刻转向它的正常状态，并

看一看在这个过程中发射了哪些粒子。

黑洞不仅产生光子，而且也产生其他粒子。具有几个太阳质量的较大的黑洞其温度是如此之低，以至于只能产生无质量的粒子。这些粒子总是以光速运动并且没有静止质量。它们是光子、电子中微子、μ 电子中微子以及相应的反粒子，还有尚未发现的引力子，也就是引力波的量子。一个典型恒星质量的黑洞产生大量的中微子（整个通量的81%）、光子（17%）和引力子（2%）。在全部发射粒子中不同的粒子占有不同的比例，是因为它们具有不同的性质。其中中微子的比例最大是因为它们的量子自转（在量子物理学中称之为自旋）最小（1/2），引力子的成分最少是因为它们的自旋最大（2）。

低质量黑洞有较高的温度。因此质量小于 $10^{17}\sim10^{16}$ 克的黑洞的温度超过 $10^{9}\sim10^{10}$ 度。除了上面列出的粒子之外，这些黑洞还产生正负电子对。注意这样的黑洞的大小只有 10^{-11} 厘米：是原子直径的千分之一。

质量小于 5×10^{14} 克的黑洞也能够发射 μ 子，甚至更重的基本粒子。

这样的黑洞比一个原子核还要小。显然，这种微型黑洞不可能在恒星演化的过程中形成。可是，它们可能在遥远的过去已经出现。如果这种太初黑洞的质量小于 10^{15} 克，它们诞生于当时物质非常稠密的宇宙膨胀的早期阶段（正如察尔多维奇和我本人所指出的那样，这在理论上是有可能的，对此霍金后来提供了详细的证明），那么到现在它们全部都蒸发完了。由于这个缘故，霍金发现的过程对于宇宙学是极为重要的。质量比 10^{15} 克大的黑洞在宇宙膨胀刚开始时也可能产生，其中质量比 10^{15} 克只稍大一些的本初黑洞现在仍在蒸发。



它们蒸发的速率相当大，所以可以用检测它们辐射的方法来检测它们的存在。但做过很多类似的尝试却没有结果。至今未能证认太初黑洞。

如果我可以允许自己有一个梦想（即使是一个严肃的科学之梦）的话，我能够设想（在非常遥远的未来）在空间人工生

产微型的黑洞。它们将积聚用于形成其能量并以给定的速度和给定的粒子能量发出辐射，其中粒子能量由黑洞的质量决定。这样的话，一个质量为 10^{15}克（中等尺度山脉的质量）的黑洞将会每秒钟发射 10^{17}尔格的能量，时间长达大约 100 亿年。

关于这个新现象，有些事情仍然是不清楚的。例如，我们不知道一个黑洞是不是不会留下任何遗迹，或者其遗迹是一个具有所谓普朗克（Planck）质量（10^{-5}克）的粒子。我们也不清楚是否能在宇宙中观测到黑洞蒸发的过程。至于在物理学家的实验室中对黑洞进行任何实验，听起来只不过像是科学幻想小说而已。但即使是我们已知的部分也足以使我们对宇宙中的物质演化的若干方面予以重新考虑。

我们关于时空之洞的故事在这里就要结束了。不到一个世纪之前，人们不仅不知道这些天体，而且，即使在我们的时代有一位旅行者回到他们那个时代试图向他们描述这些自然的奇迹，他们也无法想象出这些天体。

我希望这个故事至少部分地解释了黑洞这个主题最近已经享有的不寻常的普及性。有一首诗很适合作为本书这一部分的结尾，它描述了当一个人面对一个伟大的自然之谜，凝视着恒星死亡时出现的那个辽阔的新世界之时心中的情感。

恒星在无尽的宇宙中逝去，
一颗恒星开始衰亡，
死亡的呼唤，
呼吸与情感的终结，
进入黑暗的遗忘虚空，

留下一道鸿沟
隔开时空的彼岸，
一个阴暗的火山口
包藏于恒星的灰烬之中。
另一新生世界的饥饿咽喉
将使但丁荒凉地狱中可怕的裂口相形见绌。
这个没有尽头的，没有世界的，球形的深渊
那里时间和空间疯狂地混合，
那里条条大路通向悲惨的灭亡，
那里处处黑风怒号……
一个恒星灰烬的大旋涡，
磐石般静止不动的
火山口边缘上的光荣卫士。

第二部　宇　　宙





1. 爆炸以后的宇宙

我们生活的世界

在走向黑洞世界的旅途中,我们遇见了一些看似不可能的事情:增长着的引力场扭曲了空间和时间的性质,产生奇妙的物理过程。现在我们来走向完全不同的另一种极端:深深地进入宇宙,在那里再一次会发现引力的绝对统治。我们还要了解一个极其重要的事实:现在看到的宇宙诞生于150亿年前的一次大爆炸,而爆炸从一个神秘的奇点开始。这一奇点类似于藏在黑洞之内的奇点。

当然,自人类有思维开始,想了解自己生活于其中世界的愿望就成为人类的一种特征。人类对宇宙认识的历史既有趣也有启发性。许多本杰出的书籍都讲述过这段历史,本书却

不打算这么做。

让我们回到现代并具有现代的知识。如果有时要涉及历史的话,那只是不远的过去,难得会提到称为宇宙学的这门科学的遥远的过去。

在试图了解宇宙性质时,第一件会遇到的事是天体在空间的分布。最感兴趣的是天文学家所能接触到的最大的尺度。让我们从宇宙结构最大的单元星系开始。

读者会记得太阳是一个被天文学家称作银河系的一个巨大恒星系统的一个成员。银河系中恒星的总数大约有1000亿颗。

银河系中恒星的主要部分形如一个透镜,直径有10万光年而厚度有1.2万光年(1光年是光在1年中传播的距离,约等于10^{13}公里)。恒星际空间有气体和尘埃组成的大星云,其总质量只有恒星总质量的5%。在上述的扁平的主体部分之外,银河系还有直径为5000~10000光年的球形部分。在球形部分里的恒星要比扁平部分内的恒星暗些和年龄大些。

扁平部分(有时叫做银盘)内的年轻而炽热的恒星组成了旋臂。这些旋臂从银河系的中心开始螺旋式地延伸至最远的外围。

银河系的旋臂使它被称为旋涡星系。旋臂中有大量气体的积累。年轻的恒星就是从这些叫做气体状星云的恒星中诞生的。

银盘中的恒星和气体以近似于圆的轨道绕银河系的中心转动。太阳以大约每秒250公里的速度转动,转一圈的时间约为2亿年。球形部分的恒星也绕银心运动,但轨道很不圆而且轨道面与银盘面成各种角度。

这就是我们的恒星系的结构和尺度，它有时也被称为大恒星城。

银河系之外还有许多叫做星系的其他的恒星城。大多数观测到的星系的直径仅略小于我们的银河系：约有几万光年并含有几十亿颗星。

所有这些恒星系统离我们的距离都大于几百万光年。只有最近和最大的星系才能为肉眼所见，像是模糊的斑点，其他的只能用威力强大的望远镜来观测。它们的距离十分遥远以至其中的恒星十分暗弱，最大的望远镜才能分解出最近的星系中的个别亮星。

星系在形状、星族的组成和恒星的运动等方面各不相同。天文学家把星系分成四大类。

大多数的星系和我们的银河系相类似是旋涡状的。然而，有些星系的透镜状盘面上没有旋涡结构，由此称为透镜状星系。

相当一部分星系属于第三种。它们不是盘状的，而仅由球形部分所组成。因在照片上和望远镜里它们看上去像椭球而得名为椭圆星系。通常这些恒星系统几乎不含气体，因而，实际上没有年轻恒星诞生的区域。

不规则星系是最小的一类。它们和旋涡星系一样有亮星云，但那里的年轻星团并不组成旋臂而是成群地构成不规则分布的斑点。这些星系通常包含大量的气体。

以上简单的描述显示了星系世界的多样性。在比较星系的质量和大小时多样性会更加显著。

你或许还记得我们的银河系有大约 1 000 亿颗恒星。最大的椭圆星系可能包含 10 万亿颗恒星，同时也有矮星系，其

仅仅由上百万颗恒星组成。

什么样的星系可以看成典型的星系，是较大的像银河系那样的星系，还是小得多的星系？

这个问题就像下面的问题一样地难以回答：什么样的城市可以看成是典型的城市，是莫斯科那样的大城市还是小得多的城市？确实，有一个大城市就有几十个小城镇。星系世界中同样如此，每一个巨大的星系系统中都有许许多多矮星系。

星系在空间又是如何分布的呢？

星系在空间的分布非常的不均匀，大多数星系聚集成团。星系团的性质就和星系本身的性质一样多姿多彩。为了按序来安排好星系团，天文学家设计了几种分类法。像常遇见的那样，没有一种分类法是完美的。就本书的目的而言，把星系团分成两类已是足够了。它们是规则星系团和不规则星系团。

规则星系团通常具有巨大的质量，为球状，由几万个星系所组成。所有这些星系都是椭圆星系或透镜状星系。一至二个巨星系位于中心。离开我们最近的星系团位于后发星座方向，距离有 3 亿光年，它的直径超过 1000 万光年。这个在星系团之内，星系们以每秒 1000 公里量级的速度相对运动。

不规则星系团的质量小得多，包含星系的数目也只有规则星系团的几十分之一，而且各种类型的星系都有。星系团的形状是不规则的，大的星系团里有子星系团。

不规则星系团可以很小，小到只有几个星系组成的小集团。

比星系团的尺度再大一些又能观测到什么呢？有没有星系团组成的团，可以叫做超星系团那样的东西呢？

最近美国的天体物理学家皮伯斯(Peebles)、葛里高利

(Gregory)和汤姆生(Thomson)及爱沙尼亚的埃纳斯多(Einasto)、萨尔(Saar)和捷维尔(Jeveer)发现星系分布的大尺度不均匀性有所谓"蜂窝状结构"。"蜂窝"的壁上有许多星系和星系团,而内部却是空的。蜂窝的大小约有3亿光年,壁厚约有1000万光年。大的星系团位于蜂窝状结构的交界处。超星系团是蜂窝系统的一部分,常常极度地延伸成纤维状或条状。超星系团到处组成了巨大的空腔,腔内几乎没有任何发光的物质。在这种阶梯结构中,下一个更高的层次又是什么呢?

这时发现了一种新现象。迄今为止我们遇见越来越复杂的系统:小的系统组成大的系统,大的形成更大的,依此类推。宇宙就像一个俄罗斯木制套娃:一个小的在一个大的里面,它们又一起套在一个更大的娃娃里面。事实是宇宙有一个最大的套娃!并不存在由大尺度的条状物和蜂窝状物组成的更大的系统。平均地说宇宙是由这些单元均匀地组成的。在大于3亿光年的大尺度上宇宙是均匀的,也就是处处有相同的性质。这一点非常重要,也是大自然留给我们的谜。出于某种未知的原因,在比较小的尺度上天体和天体系统聚集起大量物质,结构越来越复杂,但在很大的尺度上这种复杂的结构消失了。这很有点像海滨的沙,贴近了来看是一颗颗的沙粒,但是从远距离看大面积的沙滩,沙看上去是完全均匀分布的。

宇宙的均匀性是根据直到100亿光年距离内的观测建立起来的。

我们在后面还要回到这个均匀性之谜,现在先来讨论一个使读者感到困惑的问题:到星系和星系团的距离不可思议地大,怎么可能度量呢?又怎么能确定星系的质量和速度呢?

量尺和其他的天文测量工具

现在从距离开始。毫无疑问，几百万甚至几十亿光年距离的测量是现代科学的一个奇迹。

就是在20世纪初，这么远的距离的测量也被认为是一件不可能的事。那么，什么样的量尺才能穿透大到不可思议的距离呢？

科学家经历了无比艰难的道路，一步一步地走向越来越远的距离，下一步总是建立在上一步成功的基础之上。

在19世纪中叶迈出了关键的第一步。在俄罗斯、德国和非洲几乎是同时测量了3颗邻近的恒星的距离。这些测量的原理与在地面上用测距仪测量距离相同。测距仪现在甚至装在照相机上而为大家所熟悉。用这个仪器测量时从不同的窗口看出去一个物体的视线方向是不同的。如果两个窗口之间的距离（称为基线长度）和两个视线方向的夹角为已知，容易用三角公式算出物体的距离。在测距仪里，这种计算是用简单的机械装置来实现的。为了使测量的结果可靠，物体的距离越远，两个窗口间的分离就要越大。这就是距离的三角测量法。在测量恒星的距离时，天文学家用地球环绕太阳的轨道的直径作为基线长度，每隔半年在轨道直径的两个端点上测量一下恒星的方向。邻近的恒星在方向上的变化不会超过1角秒，所以测量需要很高的技巧和细心。

结果是甚至最近的恒星也在1光年的距离之外。

自恒星距离测量的先驱工作以来，一个多世纪已经过去。一直到10年以前，尽管仪器和测量技术取得了巨大的进展，三角测量法所能测得的最大可靠距离仍只有100光年。

这个距离离银河系的边界还极其遥远，更不用说其他星系了。仅仅在最近天体测量新方法才使天文学家大大扩展了三角测量方法的应用范围。

通向远方的关键的下一步(说成是跳跃更为恰当)是在 20 世纪初作出的，利用了光度有系统变化的恒星，即所谓变星。

故事是从美国天文学家亨利埃塔·李维特(Henrietta S. Leavitt)的工作开始的。他研究小麦哲伦云里的变星。小麦哲伦云是离我们最近的星系之一,在南部天空可见。

在研究开始了几年之后,李维特得到了一个有趣的事实:有5颗恒星是变星,亮度是时间严格的周期函数,而且亮度变化的周期越大,恒星就越亮。李维特得到了一个令人注目的结论:“因为这些变星到地球的距离几乎相同(原注:因为它们全在同一个星系即小麦哲伦云里),它们的光变周期显然与它们光的实际辐射相关,后者由恒星的质量、密度和表面亮度所决定。”

怎么说都不会过高估计这一发现的重要性。现在只要测到恒星光度的周期就能得到它的真亮度了。

一颗恒星的视亮度与它距离的平方成反比。将恒星的真亮度与视亮度作比较就能得到恒星的距离。

实际上,为了要用李维特的资料从恒星亮度变化的周期计算它的距离,必须要知道至少一个这类恒星的真亮度。

第一个试图做这件事的是赫兹伯隆(Herzsprung)。他知道李维特描绘的小麦哲伦云里的那些变星就是大家熟悉的银河系里的造父变星。造父变星因脉动而亮度在变化。现在归结为测定至少一颗造父变星的真亮度。严重的困难是太阳附近一颗造父变星也没有,以至于它们的距离很难用三角测量方法可靠地测定,也就难于从视亮度和距离得到真亮度。

为测定银河系中造父变星的距离进行了许多尝试,正是赫兹伯隆自己得到了第一个估计值。这里不再叙述他采用的聪明的间接方法,只说明第一个和以后的多次测定工作是多么艰巨,以至于结果中包含着很大的误差。直到20世纪60年代初

这些误差才最后被排除。事实上这项工作极端重要(它是我们要探索的宇宙的尺度!),更仔细的测定一直都在进行。

一旦至少一颗有已知视亮度变化的造父变星的真亮度得到测定,就有可能得到任何一颗造父变星的距离。现在造父变星的周期与真亮度的函数关系已经建立,为了要得到任何一颗造父变星的距离,只要从观测测定它的亮度变化周期,得到对应的真亮度,将其与视亮度相比较,就可算得距离。如果这颗造父变星属于一个星团或星系,它的距离也就是到星团或星系的距离。

在这里,造父变星用来作为“标准烛光”,它们的真亮度是已知的,上面描述的方法也由此被称为标准烛光方法。

造父变星在距离测量中的作用是如此突出,以至于著名的美国天文学家夏普利(Shapley)称它们为最重要的恒星。

造父变星的真亮度很强,比太阳要亮上 1000 倍,因此在直到 1 500 万光年这样大的范围内都能观测到,适合于用来测量最近的一些星系的距离。在最近的 10 年里,用空间望远镜和新的大型地面望远镜,天文学家把这种方法的应用范围扩展到 1 500 万光年以外。

然而,我们需要测量更远的距离。

为了取得进展,必须再迈上一步。期望找到比造父变星更亮的标准烛光,以至于在更远的地方加以观测。已经找到了这样的烛光。星系通常被球状星团所围绕,这些星团因其形状而得名。

在用造父变星测得了最近星系的距离之后,对围绕不同星系的球状星团的真亮度进行了比较,结果发现如果在每一个星系里选择最亮的球状星团,它们的真亮度对所有的星系

都相同。

这样就有可能用球状星团作为标准烛光，它们比造父变星要亮。

用这种方法可测得 6000 万光年以内的距离，已可达到最近的星系团。我们上面提到的新技术可以用这种方法测得更远的距离，但远不了很多。

下一步涉及一个更亮的标准烛光。已经发现不同的星系团中最亮的星系有几乎相同的光度，大约为银河系的 10 倍。

这些最亮的标准烛光使我们可以测量直至几十亿光年的距离。

这就是天文学家用来探索宇宙深处距离的阶梯结构。

这些物体的速度又是怎样测量的呢？

从恒星和其他天体在天空的位移，可以计算它们沿与视线垂直方向运行的速度，然而，在最近的星系那样远的距离处，这些视位移毫无疑问地小到无法测量，更远的星系就更不用说了。

惟一可以测量而且能用简单而可靠的方式测量的速度是天体朝向或背向我们的速度。这种测量的基础是本书中已经提到过的多普勒效应。当一个天体朝向我们运动时，它辐射的光向光谱的蓝端移动，而背向运动时则向红端移动。从这些谱线移动的测量就能计算速度，更准确地说是速度沿视线的分量。天文学家称从多普勒效应得到的速度为视向速度。

最后来讨论星系和星系团的质量，它们能用万有引力定律来计算。

设想观测一个椭圆星系，其中的恒星以一定的速度相对运动，如果没有引力，它们会散布到整个空间中去，是整个星

系质量产生的引力阻止了它们的逸离。在测量了星系中恒星的相对速度(可以用多普勒技术)并知道了星系的大小之后,就能计算引力从而得到产生引力的质量。

类似的方法可用来得到星系团的质量,只是这时不是去测量个别恒星的运动,而是星系团中星系的运动。

对天文学家如何得到描绘大尺度宇宙结构的数据,现在读者有了大致的了解。

另一个问题却产生了:星系团和遥远的星系是怎样运动的呢?

这一问题的答案是20世纪科学最伟大的发现。结论是我们生活在一个膨胀的宇宙之中,星系团彼此在分离之中,在十分遥远的过去发生的一次神秘的大爆炸使宇宙中的所有物质处于膨胀的状态。

宇宙必须演化

1922—1924年,著名的苏联科学家亚历山大·弗里德曼(Aleksandr Freidmann)从理论上得出结论:我们所生活的宇宙要么在膨胀要么在收缩。从爱因斯坦的引力理论出发,弗里德曼的工作在数学上完全严格。实际上,无需用严格的数学也能了解他的发现的基本点,就像所有真正伟大的发现一样,它实质上很简单。

你应当记得为什么普通的恒星既不收缩也不膨胀,这是因为引力被恒星稠密的内核与松散的表面之间的压力差所平衡。与此相反,宇宙在大尺度上是均匀的,所以不存在这种压力差,引力就成为惟一重要的力。

如果在某一瞬间宇宙的巨大的质量均匀分布而且相互保

持静止，引力会立即使它们运动起来，下一个时刻物质就开始收缩。在比较小的系统里，引力可以为物体的圆轨道运动所平衡（如在太阳系中），也可能为物体在很扁的轨道上的随机运动所平衡（如在椭圆星系中），然而在包含一切的宇宙中这种平衡是不可能的，某些物体的速度可能必须大于光速，违反了自然定律。

弗里德曼的结论是宇宙不可能保持静态。实际上在引力的作用下宇宙不一定非要收缩，如果所有的物质有向外的初始速度，宇宙就膨胀，而引力只减慢物体的退行。宇宙是收缩还是膨胀取决于初始条件，或者说取决于决定物质初始速度的物理过程。这样，在理论上发现了宇宙全局演化的不可避免性。

这个概念绝对是新的并且极端的不平常。在人类历史上，描绘宇宙结构的许多不同的图像彼此更替，统治着科学。所有或是几乎所有这些宇宙的图像有一个共同的特点：宇宙有一个永恒不变的时钟，没有发展，没有演化，也没有生长，宇宙的静态似乎是显然的。宇宙中许多复杂的性质已经变得越来越清晰，但宇宙又为什么会演化，从什么状态开始又沿什么方向演化呢？

即使对于一流的科学头脑，关于整个宇宙在演化的想法也会认为是荒唐而很难接受。伟大的爱因斯坦就是一例。作为广义相对论创造者的爱因斯坦，知道他的理论对宇宙学有多么重要，在完成广义相对论的发展之后，他把场方程用到整个宇宙上去并试图找到一个静态的解，就是一个与时间无关的解。爱因斯坦自然地认为要去寻找一个静态的而不是演化的宇宙模型，但是广义相对论方程用到宇宙上去后，没有发现

静态的解。关于静态宇宙的想法是那么有诱惑力，以至于爱因斯坦对自己的方程丧失了信心，甚至设法进行修正使得存在静态解。本书后面要再次讨论这一尝试。

是什么使静态宇宙的想法如此吸引人呢？

在太阳系、恒星、星团或星系里天体看上去都像有静止和不变的性质。人们熟悉的在各种尺度上看到的天文现象的不变性被自然地推广到整个宇宙中去。亚里士多德（Aristotle）在他的著作《天论》中十分清晰地阐述了这种观点："根据代代相传的记录，迄今为止我们没有发现在远处的天空或其任何一个区域中有变化的迹象。"

在今天，人们已经熟知变化宇宙的概念，知道了恒星等天体及其系统只是看上去没有变化。人们观测它们的时间是太短了所以不能发现它们的演化。实际上恒星在诞生、生存和死亡。它们的寿命常常长达几十亿年。恒星内部的核反应维持着它的能量辐射。任何能量的储存都不是没有限制的，核能也是有限的，因此太阳和恒星在过去的某一时候诞生并且有确定的历史。

现在能够在像星系这样巨大的天体系统里观测到剧烈的爆炸和演化过程。星系里的物质渐渐地转换成恒星中的核过程。氢聚变成氦，然后成为更重的化学元素。

因此，只要考虑足够长的时间间隔，一个不变的天体系统的图像是无法令人接受的。如果要构造宇宙的一个新模型，就必须要求有一个演化着的模型，也就要确定恒星、星系等开始形成的时刻。

让我们回过来讲述弗里德曼发现的故事。在 1922 年 6 月底，德国物理学报的编辑收到了证明宇宙必须在演化的第

一篇论文。当时爱因斯坦确信描绘宇宙状态的方程一定会有静态的解因而判断弗里德曼的论文是错误的。在9月中旬，物理学报收到爱因斯坦一封短信。借用福克(Fock)的话，爱因斯坦的态度是这样的：

> 稍稍有点傲慢，爱因斯坦认为弗里德曼的结果值得怀疑。他发现了一个错误，改正之后弗里德曼的解回到了静态的解。

弗里德曼是从他的彼得堡同事克鲁特科夫(Krutkov)那里知道爱因斯坦的评论的，当时克鲁特科夫在国外。1922年12月，弗里德曼给爱因斯坦写了一封信，陈述了其推导的细节，并提出关于结果正确性的最终证明。在信的最后他写道：

> 如果你认为我信中给出的计算是正确的，请把你的意思告诉物理学报的编辑。在这一情况下你也许会考虑给你早些时候写的短信加一个附录或者就从我现在的信中摘录一部分给学报。

信寄到了爱因斯坦那里，保存在他的档案里。然而那时他没有去读信或者只是快速浏览了一下，他十分确信弗里德曼是错的。

1923年5月，克鲁特科夫在莱登(Leiden)著名荷兰物理学家保尔·艾伦弗斯特(Paul Ehrenfest)的家里，遇见了爱因斯坦。在讨论之中他说服了爱因斯坦，使他相信弗里德曼是正

确的。1923 年 5 月在给他姐妹的信中，克鲁特科夫写道："在关于弗里德曼的争论中击败了爱因斯坦，彼得堡的荣誉得到了拯救。"

在与克鲁特科夫会面之后，爱因斯坦给物理学报写了下面的说明（这里引用全文）：

> 关于弗里德曼的论文"论空间的曲率"
>
> 我前面的信批评了上述论文。经过和克鲁特科夫先生对弗里德曼信的讨论，我弄清了我的批评出自计算错误。我相信弗里德曼的结果是正确的，为这一课题带来了新的内容，发现了场方程不仅有静态解，也有动态的（即随时间而变的）且空间结构为中心对称的解。

后来爱因斯坦一再强调弗里德曼的工作对现代宇宙学发展的重要性。在 1931 年他写道："弗里德曼……是在这条道路上起步的第一人。"

宇宙膨胀的发现

遥远的恒星系统（星系和星系团）是天文学家所知的宇宙结构的最大单元，越过极其遥远的距离对它们进行观测，研究它们的运动构成了分析宇宙运动学的观测基础。

星系视向速度测量的先驱是 20 世纪初的美国天体物理学家斯利弗（Slipher）。那时并不知道星系的距离，在天体物理学家中进行着热烈的争论：这些天体到底是在我们的银河系之内还是远在它的边界之外？斯利弗测定大多数星系（他

观测的 41 个星系中的 36 个)在退行,速度直至 2000 公里/秒,只有几个星系是朝向我们运动。后来发现太阳以约 250 公里/秒的速度绕银河系中心旋转,邻近一些星系朝向我们的速度不过是太阳当前正朝它们运动的反映。

斯利弗这样就确定星系在离我们而去,它们的谱线向红端移动。这种现象称为“红移”。

到了 20 世纪 20 年代,星系的距离才得以确定。

1923 年,美国天文学家艾德温·哈勃(Edwin P. Hubble)在仙女座内最近的星系之一中发现了第一颗造父变星。一年以后他在这个星系中发现了 10 颗以上的造父变星,而在三角座的另一个星系中发现了 22 颗造父变星。

在其他的星系中也发现了造父变星。由此发现了到这些造父变星也就是到对应星系的距离,从而确定这些星系是和银河系一样的遥远的恒星系统。

在测定星系距离的第一批工作中也用了造父变星以外的方法,方法之一是用一个星系中最亮的恒星来确定距离。在银河系和其他星系中的最亮的恒星有几乎相同的真光度,因而可以作为标准烛光。这些最亮的恒星比造父变星要亮,可以从更远的距离看到,因此能更有效地确定距离。

将星系的距离与其退行速度作比较,哈勃于 1929 年建立了一个奇妙的关系:星系离我们越远,它的退行速度就越大。星系的退行速度及其距离之间有一个简单的关系:速度正比于距离,其比例系数如今被称为哈勃常数。

按照哈勃的测量,距离为 100 万光年的星系以 170 公里/秒的速度飞离我们而去。

哈勃的发现距今已有 50 多年了。天文仪器的威力已大

大增强,新的研究证实了哈勃的定律,亦即星系的退行速度与星系离开我们的距离成比例。然而,哈勃过高估计了比例系数。

哈勃的过高估计来自他确定星系距离的误差,距离被缩小了6~10倍。这并不奇怪,因为前面讲过为了测定很大的距离,必须沿着长梯逐级向上,每走一步都会发生误差。

误差的主要来源在1950年之后才被证认出来,那时帕洛玛山天文台上安装的当时最大的200英寸望远镜开始投入观测。在1952年,美国天体物理学家巴德(Baade)确定哈勃所用的那类造父变星实际上比过去的测定要亮大约4倍。这使得用造父变星度量的最近星系的距离几乎是过去测量值的2倍,加上其他的改正使邻近的星系距离扩大3倍。这一步的误差影响到以后各步,到更远星系的所有测量的距离都要乘以3。

在距离被这样改正之前,所有最近的星系看上去比我们的银河系小,这有点奇怪。在改正之后,一些星系像银河系那么大,一些更大些,这一结果令人相信距离标尺的改正是正确的。

在20世纪50年代末发现了进入宇宙深处的梯子的下几级也存在严重错误。哈勃在决定看不到造父变星的遥远星系的距离时出了错。有两个因素造成错误。首先,在测定其他星系中十分暗弱恒星的视亮度时,要和一些已知的标准光源作比较。这是一件非常困难的任务,其中确实有错。

第二个原因是哈勃错误地把遥远星系中的很亮的离子氢云当作了最亮的恒星并用作标准烛光。从这么远的距离来看,这些氢云看上去就像恒星状的亮点。结果是遥远星系的

距离要进一步放大 2.2 倍。

在考虑了所有这些因素之后，与哈勃的估计相比较，最远的星系的距离放大了 6～10 倍，还不能给出更好的估计，哈勃常数由此也以同样的倍数缩小。按照现代资料，在 100 万光年距离处的星系以大约 25 公里/秒的速度退行。

作了这些澄清之后，就能回到哈勃的发现对了解宇宙结构有多么重要这一问题上来。

这一发现表明星系沿每一方向离我们而去，退行的速度与距离成比例。

这一事实可能令人怀疑。为什么星系不是从其他天体而是从我们的银河系退行而去？我们是在宇宙的中心吗？

这个结论是错误的。实际上星系不仅从银河系退行而去，相互之间也是如此。如果我们从另一个星系观察宇宙，会看到与从我们自己的星系见到的同样的图像。

为了解这一点，想象有两个星系沿同一方向离我们而去，第二个星系离我们的距离是第一个星系的 2 倍，相应地第二个星系的退行速度也是第一个星系的 2 倍。设想把观测站放在第二个星系上，它在远离我们的星系，那里的一个观测者（他自然认为自己是静止的）看到银河系远离他而去，以同样的速度而沿相反的方向，位于银河系和第二个星系半路上的第一个星系运动得慢一些，以至于第二个星系上的观测者得出它和银河系沿同一方向运动，速度却小些。这种论断可用到三个星系中的任何一个上去。

因此在任何星系上的一个观测者都会看到星系以自己所在之处远离而去的相同的图像。

可以提出另一种模型来形象地解释这种情况。想象一个

均匀的球在变大,例如尺寸是原来的2倍,却保持着球的均匀性,显然球上任何两点间的距离也要加倍且与两点位置的选择无关。由此,无论把观测者放在膨胀的球面上的什么位置,他总会看到球面上的点离他而去。如果球的半径是无穷大,就得到了前面描述的情况,与观测者的位置无关。

基本的事实是星系确在向外飞离而去:宇宙在膨胀。这辉煌地证实了弗里德曼关于宇宙非静态的理论。

有时候人们会提出下面的问题。假定整个宇宙均匀地(平均地说)为星系团所充满,问题是:宇宙向哪里和朝着什么膨胀呢?

实质上这是一个错误的问题。宇宙是存在事物的全体,宇宙的"外面"一无所有:没有星系,没有任何其他物质,什么也没有,既无空间也无时间。不存在什么真空使宇宙可以向其膨胀。实际上宇宙并不需要在它外面有什么东西才可以膨胀。下面的例子清晰地说明这个观点。

设想有一个无穷平面,上面的点表示均匀分布的星系。沿着所有的方向均匀地拉伸这个平面使得点与点之间的距离变长。平面原来是无穷大,它向哪里膨胀呢?显然,无穷大的2倍仍然是无穷大。这就是无穷的性质。

让我们暂时离开星系和宇宙而来花些时间讨论无穷大,这是弄清宇宙的概念的关键。

无穷大是称为集合论的数学分支讨论的对象。不是专门从事这一领域的人常常对无穷大有一幅非常模糊的图像。人们往往直觉地认为无穷大是在不停地连续计数1,2,3,…后得到的东西。如果这是对的,还需要关于无穷大的理论吗?

实际上,无穷大的性质远比序列1,2,3,…的无穷延续要

深刻得多。这些性质比有限数或者它们组成的群的性质要丰富多彩得多。

现在来讨论其中的一些性质。让我们从著名数学家大卫·希尔伯特(David Hilbert)讲的故事开始(这是一个现代数学家复述的)。

假想一个旅馆有无穷多个房间,房间用自然数

$$1,2,3,\cdots$$

进行了编号,所有房间都已住满。一个新旅客很晚才到达。"客满了",接待员说。"不要紧",旅馆经理反驳,"可以把 1 号房间的客人移到 2 号,2 号的客人移到 3 号,3 号的到 4 号,一直做下去,把 1 号房间腾给新客人"。

同一个晚上又来了 1000 个客人。"客满了",接待员说。"没问题",经理不同意,"把 1 号房间的客人移到 1001 号,2 号移至 1002 号,依此移下去,新到的客人可以住空出来的 1 至 1000 号房间"。

蜂拥而至的旅客使旅馆的客人们很难在房间里得到安宁。这一次新客人的数目是无穷大,我们用 $A_1,A_2,A_3,\cdots$ 来标记他们。"客满了",接待员说。"可以解决",旅馆经理说,"把 1 号房间的客人移到 2 号,2 号的客人移到 4 号,3 号的到 6 号,也就是说每一位客人都被要求移到号码是原来 2 倍的房间,这就可以把号码为 1,3,5,… 的房间给客人 $A_1,A_2,A_3,\cdots$ 住了"。

这个故事清晰地说明无穷大的一部分可以等于其全部。确实如此,让我们写下偶数的无穷序列作为一行,再把客人的编号序列写成一行放在下面:

2,4,6,8,…

1,2,3,4,…

每一个偶数对应一个客人的编号,反过来也对。所以偶数的数目等于自然数序列全部成员的数目。初看起来,这个结论违背我们的直觉。对于数字的有限集合,偶数确实只是自然数集合的一半,然而对于无限集合,结论改变了,一部分可以等于全部,就像在比较上面两个序列时可以清晰地看到的那样。

在希尔伯特有趣的故事中的其他例子描述了许多类似的性质。

上面的例子可能令人觉得所有的无穷大都是“恒等的”,也就是说任何一个成员数为无穷的集合都能用自然数的无穷集合来计数,就像对偶数集合所做的那样。

这种感觉肯定不对!

著名数学家乔治·康托(George Cantor)在19世纪证明了直线的一个线段上的点无法用任何方式计数。不管将这些点的次序如何排列,都无法给每个点一个数而用自然数的无穷系列来对它们计数,总是至少有一个点剩下而没有一个自然数来对应。

了解这一点并不困难。设想取一个长度为1的线段,用每个点到线段左端(选为原点)的距离来标记该点的位置,用十进位小数来记这个距离。一般说来,一个点的位置要用一个无穷的十进位小数(即在小数点后有无穷多个十进位)表示,当然在特殊情况下,从某一位开始所有的十进位上可能都是零。

现在设想与我们的论断相反,某一个人将线段上的所有点成功地计了数。按照计数的次序把表示这些点在线段上的

位置的十进位小数列成一张表,第一行是计数为 1 的点对应的无穷小数,第二行是计数为 2 的点对应的无穷小数,依次类推。例如,这张表可能是:

0.328 697 008 33…

0.919 671 384 52…

0.000 637 011 04…

……

我们来证明一下线段上至少有一点没有列在表中,这张表肯定是不完全的。

为了写出表示线段上这一点位置的十进位小数,我们的做法如下。在小数点后的第一个十进位上取与表中第一行第一个十进位处不同的任何数字(在上面的例子中,不能取 3,譬如可以取 5)。在第二个十进位上选取与表中第二行第二个十进位处不同的任何数字(在上例中,不能取 1)。按照这一规则一直做下去,就可以得到一个表中没有列出的十进位小数。因为它的第一位数字肯定不同于第一个小数的第一位,肯定不会是第一行的小数。它也不会是第二行的小数,因为它们的第二位数字肯定不同……

用这个小数表示的距离对应的点不在那张表中,因此就不会有一个编号。

人们可能会认为计数应当从这一点开始,在它之后的所有点就可以计数了。就像荷兰数学家汉斯·弗瑞德特尔(Hans Frendenthal)开玩笑说的那样,这是赌咒能吃 20 个土豆的人用的策略。这个人在吃了 19 个以后,觉得无法再咀嚼最后这一个了,他抱怨说:"我本来应该从这个土豆开始的。"

显然,如果从没有编号的那个点开始计数,用完全相同的方式肯定能找到在新的计数中存在另一个点没有编号。

看看这种有些不平常的叙述,读者可能有点疲倦了,但是我要陈述的事非常重要,目的是让读者对无穷大世界的性质是多么奇异有一点了解。

直线上长度为1的线段上的点的个数肯定大于自然数集合中的数的个数。数学家说直线上一个线段的点的无穷集合的基数要高于自然数集合的基数。

无穷大因此并不都相同。一些有比较大的基数,也就是有较多的元素,一些的基数要小些。

看上去似乎整个直线上的点数肯定大于一个单位长度线段的点数,因为线段仅仅是直线的一部分。然而现在我们聪明些了,我们还记得在无穷大世界中"一部分小于整体"未见得正确。直线和其线段上的无穷点集确实有相同的基数,它们是不能区分的无穷大。

再深入讨论下去,整个平面甚至整个三维空间的无穷点集都和直线上线段的点集有相同的基数。所有这些无穷大都等同,因为整个无穷大空间的点集不比线段的点集有更多的内涵。你可能会猜测根本就不存在有更大基数的点集,就是说这个无穷大是最大的一个。

这种猜测是不正确的。数学家能够构造具有越来越大基数的集合,亦即有越来越多内涵的无穷大。换句话说,不存在最大的无穷大。数学家构造的无穷大序列也是无穷大。

在走向无穷大世界的旅程中我们就到此为止。通向无穷大的旅行和走向黑洞或是去宇宙深处都同样吸引人,然而那是通向人类知识另一领域的道路。

现在回到宇宙的膨胀。在读了上面关于无穷大的故事之后,我们再也不会对"无限的宇宙可以无限地膨胀,不需要宇宙之外有什么,不需要不属于宇宙的事物"这类话感到惊讶了。

在希尔伯特的故事里,无穷多个旅客可以住进编号为偶数的房间里,他们之间的距离是原来的2倍,所以宇宙中星系之间的距离也可以加倍而不会跑到宇宙之外去。

然而,还有一个重要的问题:宇宙为什么会膨胀呢?星系的速度是怎样产生的呢?读者应当记得引力理论并不能解答这个问题。星系因惯性而向外运动,引力使它们的速度减慢。

本书的最后一章将回到是什么使宇宙膨胀这一问题上来。

这里有必要作最后一点说明。有时候说由于宇宙的膨胀,宇宙中存在的每一件事物都在膨胀:星系们不仅在相互退行而且本身也在膨胀,每一颗星、地球和所有其他的天体全是这样。这种说法完全错误。星系的退行并不会影响个别天体的大小。宇宙学的膨胀对那些引力聚集的天体如星系、恒星或地球并不起作用,就像气体云的膨胀不会影响个别的气体分子。毫无疑问,宇宙里的天体可能膨胀或者收缩,但这些变化是内部因素亦即发生在天体内部的过程所造成的。

宇宙真的在膨胀吗

关于宇宙膨胀的结论并没有立即得到广泛承认。整个宇宙在演化的观念太有轰动效应了。这个观念会导致许多不可思议和无法想象的结论。它意味着在十分遥远的过去,在膨胀开始的时候,宇宙看上去与今天看到的十分不同。在本章

开始时提到过这种想法曾面临很多反对意见,部分来自科学家思维中的惯性,部分来自脱离实践的伪哲学论断。一幅不变而静态的宇宙图像似乎要习惯和简单得多,于是有许多人尝试去对观测到的遥远星系谱线中的"红移"不用多普勒效应来解释。如果能找到另一种解释,就可以认为星系不在退行、宇宙不在膨胀。

加拿大幽默作家和经济学家斯蒂芬·李柯克(Stephen Leacock)写的诙谐短文《常识和宇宙》出色地反映了这种态度。

> 自这一可怕的思想宣布以来,25年已经过去……在一个膨胀的、每件事物都以惊人的速度相互飞离而去的宇宙里,我们尽可能地好好过日子。这种思想让我们想象在一场罗曼史中失望的情人们跃上骏马狂野地朝所有方向飞驰而去。就其广度和深度而言,这种思想极其宏伟,但却给人有点不舒服的感觉。

甚至今天还有人试图"捍卫"宇宙的静态,但物理的现实是什么呢?有没有一个物理过程使光子变得"红些"而星系却无需退行?

原则上有这样的过程。

一个量子要"变红",必须损失一些能量。量子在穿越宇宙的旅途中可能会和星际介质中的电子发生碰撞,能量损失可能产生。在另一些假设中,它与星系际空间的其他光子相撞。在所有这类假设中,一个产生碰撞的光子不仅损失能量

而且也改变运动的方向,结果是朝我们射来的光量子开始渐渐地沿发散的轨道运动,遥远星系的图像会变得有点模糊。

并没有观测到这种效应,因此不能解释"红移"。此外,这种解释会要求星系际介质有非常高的密度,可能会产生许多其他的观测效应。

光子"红移"的另一种机制是假想光子发生衰变,伴随有产生其他至今还未知的粒子。早在20世纪30年代,苏联物理学家勃隆斯坦(Bronstein)指出如果这种过程确实存在的话(以后证明并不存在),光子衰变的概率反比于频率。由此,一个光子的波长越长,就更多地向红端移动。射电波的量子预期比可见光量子向红端移动得更快些。20世纪60年代,21厘米波长的射电谱线的频移得到了精确的测量。在许多星系的冷星际气体的光谱中能清晰地看到这条谱线。

观测了总共30个星系,发现它们在射电频率段的"红移"和可见光的"红移"完全相同。

因此,必须完全排除光量子的"红移"是由于它们老化而造成的假定。

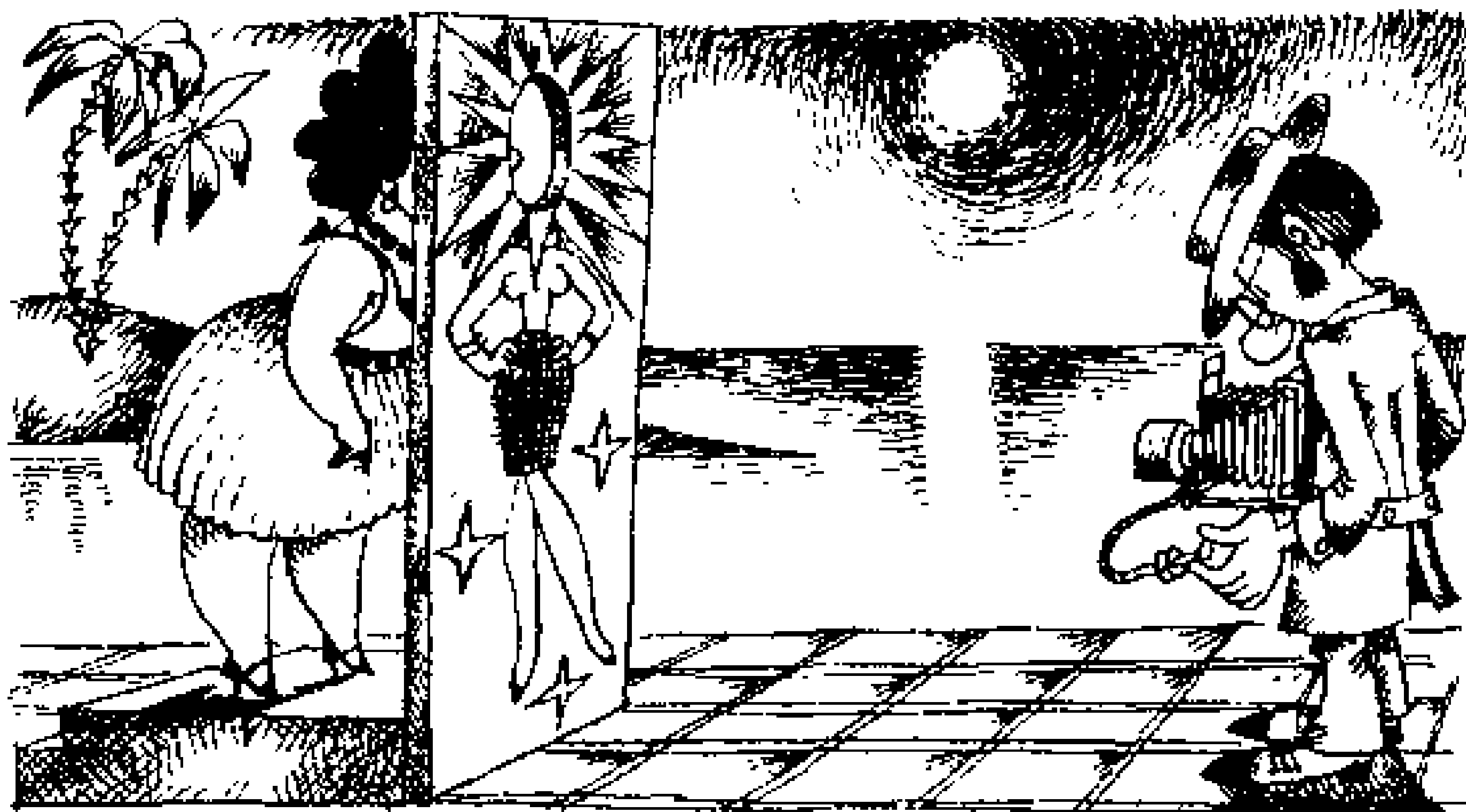
宇宙学"红移"惟一可能的解释是宇宙膨胀产生的多普勒效应。

应当再次强调在天文学家的观测发现之前,理论家已经预报了宇宙不可能为静态,"红移"的发现证实了这一预言。我们不应像那些具有固执和传统的保守信念的人那样为"红移"和宇宙膨胀现象而过度惊讶,宇宙的非静态是物理学基本定律的直接推论。

如果观测并没有发现星系谱线有系统的移动,亦即没有发现非静态的证据,那么引力定律就需要改正,说明有一种至

今未知的力在阻挠引力使宇宙非静态。

事实上，在爱因斯坦创立现代宇宙学的时候，在弗里德曼和哈勃的工作之前，就试图引进这样一种力。我必须说明，有一些天体物理学家指出，在因宇宙膨胀造成的宇宙学“红移”之外，还有其他原因造成的“红移”。例如，来自强引力场或其他至今仍不清楚的物理过程。原则上这类过程并不是不可能的，然而我认为与支持这些假设相关的资料是模糊而不确定的，能够用传统的方式来加以解释。



2. 宇宙的力学

过去的宇宙

如果宇宙的膨胀是事实,今天看到的宇宙就与过去十分不同。如果星系相互间在离散,那么某个时间之前它们必然相互接触,而在更早的时候不会存在个别的星系。用星系的退行速度去除星系间的距离就可以得到星系开始分离到现在的时间间隔。前面提到过星系间的距离约为 100 万光年(10^{19}公里),分离的速度约是 25 公里/秒,除一下得到 130 亿年。若星系的距离远 2 倍,它的退行速度也是 2 倍,除一下还是得到相同的结果。

因此星系大约是在 130 亿年前开始分离,然而应当记住在计算星系距离时可能有误差,因此膨胀开始的时间也有不

确定因素，可以说膨胀于100亿～200亿年前开始。

上面的计算假定星系以不变的速度运动。实际上引力会减慢星系膨胀的速度，但这个因素不会严重地改变上面给出的数字。

比较膨胀开始的时间和宇宙中一些天体的年龄是有趣的。例如，银河系中球状星团的年龄据估计是100亿～140亿年。地球和太阳的年龄大约是50亿年。

这样就发现了行星的年龄以及很可能还有星团的年龄并不比宇宙开始膨胀至今的时间小很多。

在100亿～200亿年以前，在接近宇宙开始膨胀的时候，宇宙中的物质密度要比现在高很多。星系、恒星等无法以个别天体的形式存在，整个物质处于一种连续均匀介质的状态。在膨胀以后很久，介质分离成个别的球状聚集物，然后形成天体，后面还要说到这个过程。

有许许多多其他的问题。关于膨胀的开始和关于整个物质的极端高密态(这种物态称为奇异的)的结论可靠吗？可靠到什么程度呢？在这种超密状态下发生了什么物理过程呢？是什么力量驱动了宇宙的膨胀呢？最后，在膨胀开始以前，在这个奇异的瞬间之前那里又有些什么呢？

所有这些问题无疑十分重要和有趣，在本书余下的篇幅中将一一予以讨论。

真空中的引力

空的空间(现代科学语言称之为真空)中引力的科学概念的历史存在和对宇宙性质同样的矛盾，亦即关于宇宙不变的传统信念和引力理论隐含的关于宇宙不可能静止的状态之间

的矛盾。

万有引力定律说所有的物体相互吸引。但是真空中有引力吗？在现代物理中，早在1917年，爱因斯坦提出了这一问题：真空中的引力是什么呢？这个问题是怎么产生的呢？什么物理实验和天文观测与这个问题有关呢？事实上，那时没有直接的观测资料；相反，正是缺乏星系运动的观测资料使爱因斯坦思考真空中的引力。

情况是这样的，广义相对论建立后不久，爱因斯坦将其作为建立宇宙数学模型的基础。这种尝试是在弗里德曼的工作和哈勃发现星系光谱中的“红移”之前，在爱因斯坦的世界图像中静态而不变的宇宙的概念占据着主导的地位：“世界永恒不变”。然而我们已经看到引力定律意味着宇宙不可能静止。

为了要与引力相平衡而使宇宙保持静止，必须引入与物质无关的斥力。爱因斯坦通过定义宇宙斥力来使宇宙静止。宇宙斥力作用在物体上所产生的加速度仅仅依赖于物体之间的距离而与其质量无关。

爱因斯坦那时证明了斥力必须正比于物体间的距离，比例系数称之为宇宙学常数。为了使斥力能与普通物质在星系际空间中的吸引相平衡，这个常数一定要很小。

本节的后面要简要讨论产生斥力的可能的物理原因。这里只说它可能来自真空中的量子过程。

如果自然界确实存在斥力，原则上可以用高精度实验室实验来检测。事实上宇宙学常数是不可思议地小，在实验室中检测是绝对没有希望的。容易计算出一个物体在地球表面作自由下落时，斥力产生的加速度要比自由下落的实际加速度小30个量级。即使在太阳系或整个银河系的尺度里，斥力

与引力相比也是小到可以忽略。可以毫无困难地证明太阳作用在地球上的引力加速度为0.5厘米/秒^2,而太阳和地球之间的宇宙学斥力加速度要弱10^{22}倍！显然,这种斥力即使存在也不会影响太阳系天体的轨道,只能够通过研究最远的可观测星系的运动来予以检测。

这就是描绘真空中斥力的宇宙学常数是怎么在爱因斯坦的引力场方程中出现的。和万有引力一样它也是万有的,亦即和物体的物理性质无关,因此可以逻辑地把这种作用称作真空中的引力,尽管通常把引力看做是产生吸引的力而这里说的却是排斥。

在爱因斯坦关于广义相对论的工作几年之后,出现了弗里德曼的理论。在此之后,爱因斯坦倾向于认为不应当把宇宙学常数硬加到引力场方程中去,因为没有这个常数也能得到整个宇宙的解。

一旦发现了星系谱线中的"红移"而表明宇宙在膨胀,宇宙斥力假设的基础也就不复存在。实际上,描述膨胀宇宙的解也可以从有宇宙学常数的引力场方程中得到。要做到这一点,只要让引力和斥力不严格地相互抵消就是了,这时占统治地位的力使宇宙处于非静止状态。弗里德曼的先驱性工作已经指明了这种可能性。哈勃时代的"红移"观测精度不够,不足以决定自然界实现的是哪一种解：有还是没有宇宙学常数。然而相当一部分物理学家不喜欢方程中的宇宙学常数,因为不但缺乏观测基础,理论也变得更加复杂了。爱因斯坦甚至责备引入宇宙学常数为"我一生中最严重的错误。"

以后我们会说明他看做是自己错误的想法实际上是了解初等粒子间物理作用性质的第一步,也是洞察真空性质的开

始。然而在20世纪开始的时候，扔掉宇宙学常数是相当自然的。20世纪30年代的宇宙学家们并不急于排除宇宙学常数。他们有足够的根据来保留它。读者会记得对哈勃常数最早的测量曾使该常数的值被高估了大约10倍。如果用这个估计值来计算膨胀开始至今的时间，得到了只有10亿～20亿年，而不是正确的100亿～200亿年。20亿年是非常短的时间。首先，它甚至比地球的年龄还要短；其次，更为重要的理由是当时恒星和恒星系统的年龄被错误地估计为10万亿年，要比大爆炸以来的时间长上4个量级。

今天我们知道大爆炸开始以来的时间被低估了近10倍，而恒星的年龄高估了大约2个量级还多。从现在的观点看，这两个估计之间没有矛盾。然而在20世纪30年代，两者间的差别被看为是一种严重的困难。

宇宙学常数就成了一种使大爆炸以来的时间与恒星的年龄相一致的手段。万有宇宙斥力的想法复活了。

让我们来看引进宇宙学斥力是如何剧烈地改变了宇宙膨胀的时间尺度的？

假定宇宙学常数不是零，假定宇宙从一种非常高的密度状态开始膨胀，在膨胀开始时极高的密度使引力比斥力要强得多，因为引力与密度成比例，这样引力减缓了退行运动。

随着继续膨胀，密度最终减小到使引力与斥力相平衡，这时宇宙以不变的速度膨胀，没有加速度。如果这个速度很小，引力和斥力几乎完全相等的状况会保持很长一段时间。因此膨胀几乎完全停滞的阶段（称为滞胀）会持续很长时间。然后物质密度不可避免地减小了，引力变成小于斥力，宇宙开始以斥力造成的加速度膨胀。调整模型参数可以使滞胀延长。这

种假说假定滞胀已经过去而现在宇宙正加速地膨胀。

引入宇宙学常数就拉长了宇宙膨胀的时间尺度，使之能和恒星的年龄相一致。

在20世纪50年代对哈勃常数重新作了估计。在这之前，在20世纪30年代末建立了恒星的能源来自氢到氦的转换。在20世纪50年代完成了恒星演化的现代理论。年龄矛盾消失了，不再需要宇宙学常数，这是历史上的第二次。

1967年发生了宇宙学常数的第三次回归。那一年天文学家发现并仔细观察了一类令人惊讶的不平常的天体：类星体。在第一部中曾经简要地叙述过它们的性质。

类星体仍然有一大堆的秘密和一大堆没有解决的困惑。这里仅仅指出类星体的两个特性。首先，它们非常之亮以至于它们即使在比遥远星系更远的地方也能被看到。类星体越远，它的视亮度就越弱。与此同时，类星体必须服从宇宙膨胀的定律，它的距离越远，退行就越快，谱线中的“红移”也就越大。

因此，可以预期类星体的视亮度越小，它的“红移”就越大。

观测并没有发现这类现象。为了作出解释，美国科学家彼得罗逊(Petrossian)、萨彼得(Salpeter)和谢克斯(Shackers)猜测类星体的视亮度及其光谱中的“红移”之间没有联系的理由可能是宇宙斥力。下面来澄清这个论点。

这些美国科学家强调，一般说来类星体的距离非常之大，超过了望远镜所能观测的最远的星系。在观测巨大“红移”也就是远距离的类星体时，记录下来的是很久以前辐射的光。如果是在有宇宙学常数的理论预报的宇宙停滞的时候光离开

类星体，因为观测涉及的那个时代里宇宙几乎不膨胀，较近的和较远的类星体一定会有几乎相同的“红移”。

情况确实如此。想象光线在膨胀停滞的时代离开类星体，在几乎无膨胀的宇宙里传播了很长的时间，因此也就不会“变红”。在这根光线射向我们的路上时，另一光线从离我们较近的类星体辐射出来，后者和前者在我们生活的时代一齐到达地球而被观测者观测到。两根光线在几乎静态的宇宙中传播而没有“红移”。后来，在膨胀停止阶段结束后宇宙再次膨胀，从两个类星体来的光线“变红”的程度相同。结果是从较近因而较亮的类星体射来的光和从较远因而较暗的类星体来的光有几乎相同的“红移”。这意味着许多类星体的光谱有相近的“红移”而视亮度却有很大差异，两者之间并不相关。

苏联天体物理学家史克洛夫斯基和卡达晓夫(Kardashov)在讨论类星体光谱的另一些特征时，也倾向于过去有过膨胀停滞(也就是倾向于非零的宇宙学常数)。

在宇宙膨胀的历史上真的发生过停滞吗？只有新的观测能给出答案。

自第一次提出这个问题以来，已经过去了20年，进行过许许多多类星体的新观测。主张有一个膨胀停滞阶段的论断开始渐渐地崩溃。新的观测表明类星体的亮度分布范围很广，造成它的视亮度和“红移”之间不相关。与星系团中最亮的星系不同，类星体不能被看做是“标准烛光”，也就不会有那种关系。如果蜡烛有差别很大的真亮度，同样的情况也会发生：它的视亮度不再表示它的距离。

其他的倾向于膨胀停滞的论点也必须舍去，包括那个宇宙学常数。这是第三次扔掉宇宙学常数。

然而人们常说巨灵一旦从瓶中放了出来就很难让它回去。非零宇宙学常数的想法仍然十分活跃。

显然,即使宇宙学常数不是零,也一定非常小,当然几乎不可能用观测来证明它准确为零。宇宙斥力确实存在吗?

这一问题使物理学家思考宇宙斥力的性质。在"宇宙为什么是这样"那一节中将要详细地讨论。现在仅仅请注意由于真空中虚粒子相互作用的能量(在第一部第五章"黑洞和量子"中有所提及),空的空间可以一直保持不为零而小的能量密度。这样一来,应力一定会与能量密度同时存在就成了真空的性质。可以说明这种应力构成了前面讨论的万有斥力。

应该强调在相当大的程度上物理学家还不了解真空的性质。

观测宇宙学的最新进展再次提出在当前宇宙的演化中真空引力究竟扮演了什么角色。至今仍然没有明确的答案。然而在大爆炸刚刚开始的时候它起着决定性的作用,那时真空的性质也和今天非常不同。以后会讨论这一点,这里只说明关于宇宙学常数想法的第四次回归可能已经来临。

读者很可能会对那些专家有一种不信任的感觉。他们找到论点来支持真空力的想法,然后又找到了反论点,一会儿支持一会儿反对,来回往复。这种反复无常对科学研究或是对整个科学可靠性的信念难道不是致命的吗? 斯蒂芬·李柯克在前面引用过的那本小书中作了类似的陈述:

> 并不是我斗胆敢于不信仰或不尊敬科学,在我们的时代这就像在依撒克·牛顿的时代不信仰三位一体那样会蒙受羞辱。但我们开始怀

疑……所以我们必须再次捡起我们的小书，紧
跟科学，等待着下一次天文学会议。

好吧！不开玩笑，科学经常会有这种情况。从不同的方面，从物理学进展的不同层次，用越来越有威力的工具来逼近一种科学思想。一个很复杂的课题要经历很多次的冲击，才能求得正确的解。一般说来在这种过程中会产生越来越深入和越来越复杂的问题。

关于真空的困惑属于这类课题。

膨胀宇宙的未来

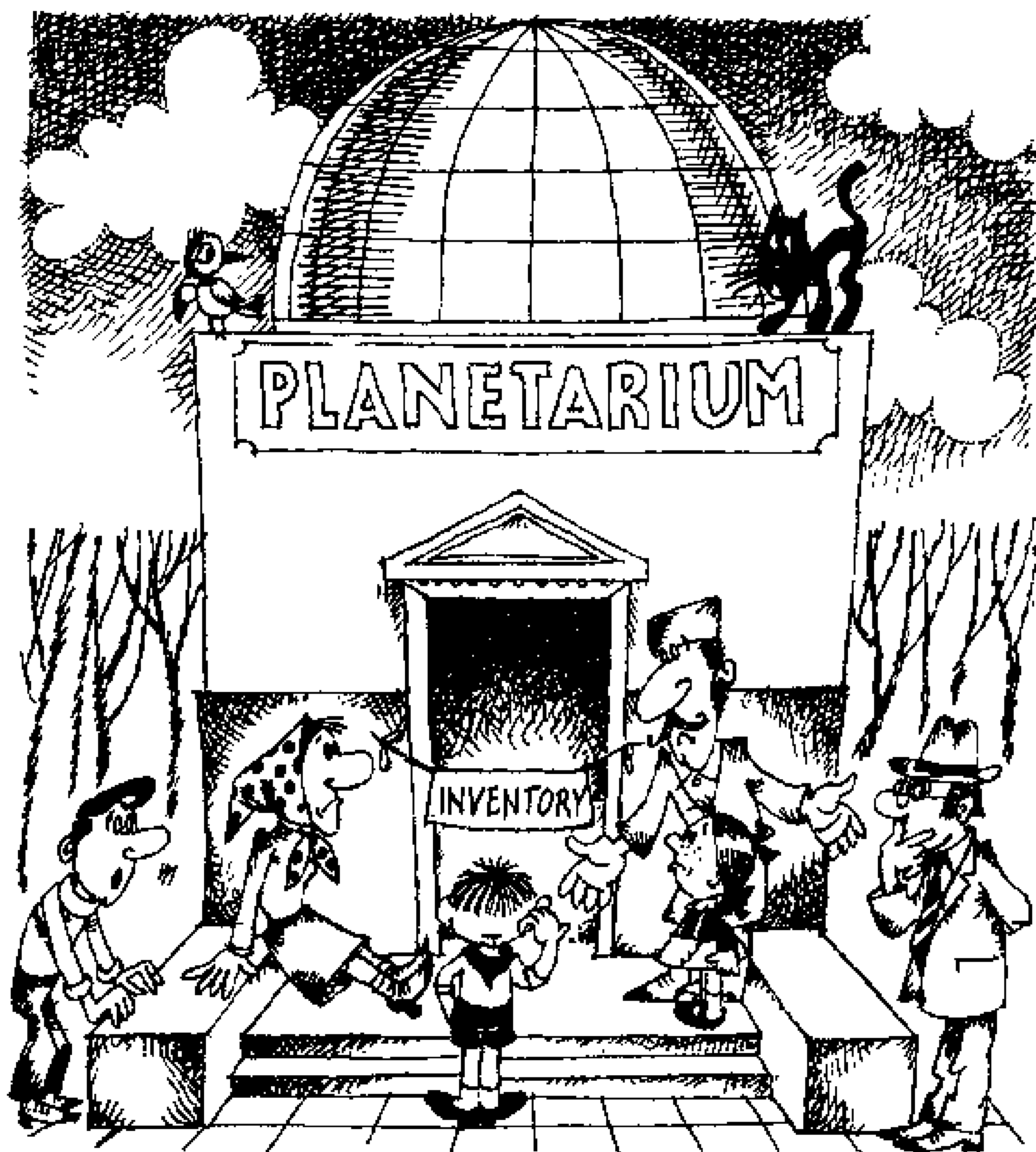
如我们在上节中所述，我们仍然不了解宇宙学常数在宇宙当前的膨胀中所起的作用。让我们像爱因斯坦那样设它为零，看看在未来膨胀如何进行。

引力减慢宇宙的膨胀，未来有两种可能。如果引力造成的减速度小，膨胀会永远持续下去，星系团之间的距离会无限地增长。宇宙中的引力是由物质的平均密度决定的。平均密度定义为当所有的天体、气体云和星系在整个空间均匀分布时的密度。平均密度越大，引力就越强。因此，足够低的密度意味着膨胀永远不会停止。然而，有可能现在的密度足够高使膨胀的减速度比较大。这时在未来的某一时刻膨胀将会停止而开始收缩。

这种情况非常类似于想从一个天体逃逸而加速到一定速度的火箭。要逃离地球进入太空，12 公里/秒的速度是足够了，它已经大于逃逸速度。然而这个速度却不足以逃离木星表面，我们提到过木星的逃逸速度要 61 公里/秒。

以 12 公里/秒的速度从木星弹出的物体会一直向上，可是还要落回到木星的表面上。

因此宇宙当前的膨胀速度（它当前的哈勃常数）决定了一个临界的物质密度，这个密度值是上述两种情况的分界。



计算表明，平均地说这个临界密度是每立方米 10 个氢原子，也可以用另一个元素的等价数量来表示。如果宇宙密度

的真值是大于这个值，当前的膨胀在未来会转为收缩；如果小于这个值，膨胀是永恒的。

实际观测到的值是多少呢？

不幸得很，这个问题并不容易回答。人们必须考虑到宇宙中存在的所有类型的物质，因为引力场是由它们生成的。

计算恒星、星系和亮气体云中的物质虽然有困难却是可行的。然而在星系际空间里可能存在大量的很难观测到的或是不可见的物质，它们不或几乎不辐射也不吸收光。

计算这些“隐”或“暗”的物质是一种极端困难的任务。至今仍然没有对上述问题的准确的和详尽的解答。然而能进行一种可靠的估计，如果只计及亮星系，宇宙的平均密度是临界密度的30％。

如果没有不可检测的物质，宇宙的膨胀是永恒的。

暗物质问题

天文学家有足够的根据来推测星系际空间可能包含大量的不可见(“隐”)的质量，不可见的暗物质晕可能环绕着每个星系。

这种猜测的理由之一形成于对星系团质量的测量之中。测量按以下方式进行。

规则星系团形状对称，星系密度随离中心的距离增加而逐渐减小，因而有足够的理由来假定星系团处于平衡状态，星系运动的能量为星系团中所有质量相互的吸引所抵消。在这种情况下能够测得引力从而得到星系团中所有类型物质的质量，因为所有类型的质量都参与了生成引力场。

例如，关于后发座星系团的计算，给出的质量为2×10^{15}

太阳质量。

然而星系团的质量也可以用另一种方法来计算。对星系团中的所有星系进行计数,用平均星系的质量乘这个数,所得的结果大约是用第一种方法得到的数字的 1/10。

结论是星系之间有生成附加引力场的不可见物质,第一种方法计及了这些物质而第二种方法没有。

对其他星系团的资料分析也给出了类似的结果。

当然,不管用哪种方法,误差是不可避免的,然而误差不大可能大到可以解释结果的差别。仔细的分析表明,极不可能把星系团的相互矛盾的巨大质量归结为方法误差。这些结论使得人们非常认真地去寻找暗物质,不仅在星系团内找,也在星系团际空间找。关于暗物质存在的形式能说些什么呢?是星系际气体吗?星系际空间的体积确实是远远大于星系所占据的体积,因此即使星系际气体的浓缩程度远低于星系内气体的聚集程度,星系际空间仍然可以有巨大数量的物质。

应当强调星系际气体不是暗物质状态的惟一候选人,存在其他类型的物质也是可能的。后面会来讨论这个假定,现在回到星系际气体并来寻找检测它们的方法。

读者会记得宇宙中的气体大部分由氢组成,因此在星系际空间中搜寻气体相当于搜寻氢。气体可能是中性的也可能处于电离状态,取决于物理条件。

让我们从估计中性氢可能的数量开始。

如果从远处辐射来的光经过中性氢原子气体,这些原子会吸收一定频率的辐射。可以从这种吸收来尝试检测广漠空间里的中性氢,十分遥远的类星体可以用作为光源。几次检测都表明星系际中性氢的数量非常之少,它的质量只有星系

中亮物质的几万分之一。

因此，如果星系际气体确实存在，它一定是电离氢并被加热到高温。一种分析表明温度一定高于100万度。这种气体尽管温度高实际上是看不见的。这并不令人惊讶，因为它的密度很低，气体是透明的，在可见光范围内辐射很弱，然而这种电离的高温等离子体有相当强的紫外（UV）光和软X辐射。

热气体可以用它的紫外辐射来证认，还存在一些搜寻星系际热气体的其他方法。

很不幸，所有的方法都没有足够的灵敏度。关于这种气体的数量以及它的平均密度是否大于星系物质平均密度的问题仍然有待解决。

现在回到星系团中的气体。射电天文观测表明星系团包含数量可忽略的中性氢，然而卫星的X射线望远镜已经成功地检测出了富星系团中的热电离气体。它的温度估计为3000万度至1亿度，总质量可以高达10^{14}太阳质量。虽然后发座星系团的总质量要大得多，超过10^{15}太阳质量，电离气体的质量仍然是一个可观的大数字。星系团中的热气体不会是暗物质问题的惟一解答。

20年前发现了这个重要问题的另一个方面。

近年来关于星系是由暗弱的、实际上不能检测的物体组成的大质量冕所围绕的想法得到越来越多的赞同。这些物体的可能的候选者之一是低亮度的恒星。冕质量不可避免地影响着矮星系的运动，而矮星系是主星系的卫星。不能排除当考虑了冕以后，星系团中星系的质量可以大幅度增加。

我们还未提到暗物质其他一些奇异的候选者，例如中微

子、引力波和一些其他类型的物质。在关于"中微子宇宙还是'X微子'宇宙"那一章要回到这些千奇百怪的可能性。

上面的问题可以总结如下。

亮物质的全部质量不足以减缓宇宙的膨胀并使它收缩。关于暗物质至今所知甚微。它的数量大约足够使宇宙物质总密度高到接近或达到临界密度值。

很可能宇宙将无限地膨胀下去,或者在未来很长的时间内会保持膨胀。

弯曲的空间

我们很快就会看到宇宙实际的平均密度不仅决定宇宙的未来,而且也决定它在空间上的延伸。这个词可能已经使读者警觉,一个唯物主义者对宇宙空间的延伸能有两种意见吗?事情难道还不够清楚,宇宙空间在所有方向都能无限制地伸展到无穷吗?

似乎任何其他的看法都会导致假定物质世界有一种边界,边界之外有一种非物质的"事物"。遍及整个科学史,为任何一个自发的唯物主义者所能接受的惟一空间图像是在所有方向伸展到无穷远的空间。2000年以前古罗马的哲学天才提丢斯·卢克利提乌斯·卡拉斯(Titus Lucretius Carras)在他的诗歌"边界事物的性质"里清晰地阐明了这种论点:

整个宇宙在任何方向都没有边界;
因为有边界就会有一个端点。
看起来不会有端点,
除非在它之外还有事物,

还有一块地方我们的意识不能理解。
因此我们必须承认宇宙之外一无所有，
没有端点，也没有边界和极限。
这是真理，不管你站在什么立场上；
无论你站在什么地方，
朝每一方向看去都是无边无垠。

一个又一个世纪过去了，关于空间无限又无界的论断被信誓旦旦地重复着。

从今天的观点来看，这些说法是无知的。对传统观点的第一次打击来自理论的发现，发现几何学有可能不同于学校里为学生讲授的欧几里得几何。19世纪几个伟大的数学家作出这一发现。他们是尼考拉·罗巴切夫斯基（Nicolai Lobachevsky）、扬诺斯·波利埃（Janos Bolyai）、本哈德·黎曼(Bernhard Riemann)和卡尔·弗雷德里克·高斯（Carl Friedrich Gauss）。

什么是非欧几何？用几何的语言很容易解释：欧氏几何研究平面上几何图形的性质而非欧几何研究曲面上的图形，如球面上的或马鞍形曲面上的图形。这种曲面上没有直线，它们之上的几何图形的性质与平面图形不同。直线为点之间最短路径的轨迹所取代，这种路径称为测地线。例如，球面上的测地线是大圆弧。地球表面上的子午线是测地线的一个实例。人们可以在球面上画出边由测地线组成的三角形，可以画出圆并研究其性质。这一切都容易想象。当我们不是讨论二维曲面而是三维非欧空间时困难就出现了。在这个空间里的棱柱、球体和其他立体的性质都和学校里讲的不一样。和

曲面类似，可以说这个空间是弯曲的。实际上这种类比并不有助于形象地观察弯曲的三维空间。我们生活在三维空间内，无法跳出去(因为空间“以外”——无所有)，所以像“我们的空间朝哪里弯？”这种问题没有意义。说空间是弯曲的是指与欧氏几何统治的平坦空间的性质相比较，弯曲空间的性质有所不同。

读者或许还记得在关于黑洞的章节中说到广义相对论的结论，即有强引力场的空间是弯曲的，它的几何性质有所变化。

当转向讨论延伸的宇宙时，考虑的尺度越大涉及的物质就越多，引力场就越强。对大尺度问题，必须应用爱因斯坦的理论并考虑空间的曲率。

这时会遇到一个奇妙的现象。为了解新现象的本质，让我们回到弯曲的二维曲面。

取一片平面，如果逐渐地接上其相邻的部分，它越来越大，最后得到无限地延伸到无穷的整个平面。

现在取一小片球面，如果它非常小，我们甚至不会注意它是弯曲的，接上相邻的片，覆盖的区域越来越大，弯曲变得明显了。这个过程继续下去就会发现曲率使曲面自我封闭而形成一个闭球面，已经无法使这个曲面无限地延伸至无穷，曲面闭合了。球面的面积有限却没有边界。在球上爬行的一种扁平生物永远不会遇到障碍——边缘或者疆界，然而球面并不是无限大的曲面。

以上清晰地表明如果一个曲面是闭的，它可以没有边界，但却不是无限的。

让我们回到三维空间，它的弯曲可以类似于球面的弯曲，

空间可以自我封闭,没有边界但却包含有限的体积(就像一个球面包含有限的表面面积)。

极难找到一个形象而清晰的实例,但也不是完全不可能。现在我们理解了在卢克利提乌斯的诗句中排除了任何壁垒设置的空间边界,但没有排除空间体积为有限。确实,空间可以是无界但却包含有限的体积。

弗里德曼建立的宇宙模型说明这完全可能,只要宇宙的平均密度大于临界值,那时空间是有限的和闭的。这样的模型称为闭宇宙模型。

如果宇宙物质的平均密度等于临界值,空间几何是欧氏的。这个空间被称为是平坦的,它在所有方向延伸到无穷远,而且体积是无限的。

最后,如果物质的密度低于临界值,空间几何再次是弯曲的。但它的几何不类似于球面上的几何而类似于马鞍形曲面的几何,空间在所有方向上无界地延伸而不会闭合,它的体积是无限的。这称为开宇宙模型。

我们实际的宇宙是开的还是闭的呢?

你或许还记得空间的平均密度仍然是未知的,因而我们不知道它高于还是低于临界值。

这样我们就不知道宇宙是开的还是闭的。

关于世界可能是闭的,有着闭的空间的想法肯定是个不寻常的想法。就像宇宙在演化的想法一样,这个想法在得到承认的历程中曾经面临困难。反对的论点部分来自类似的传统推理和偏见,部分来自一些道学者低下的教育水平,他们主张只有空间体积无穷大才和唯物主义相容。我记得学生时代一次热烈的争论,那是在莫斯科召开的第六届苏联宇宙学会

议上。

下面这段话引自一个与会的哲学家的发言："确实，如果假定宇宙在空间上是有限的，人们立刻会面临许多无法回答的问题：怎样去想象一个体积为有限的宇宙？在它之外有些什么？……"

你会注意到这些论点比卢克利提乌斯说的那些要原始得多，是专门用来煽动公众舆论的。很长时间以来我们已经知道这类煽动在讨论中是没有价值的论点。

显然，关于空间可能是闭的结论缺乏理想主义的内涵。

唯物主义哲学的基本假定是物质仅能在空间存在。"世界上只有运动中的物质，而脱离空间和时间的物质就不能运动"（弗·伊·列宁）。自然科学的任务是确定空间一些特定的性质，例如决定它的体积是有限还是无限的。

金兹伯格有一次讲了一句很有分量的话："意识形态不是用立方厘米的数目来决定的！"

今天这样的争论已成为过去，是科学来确定世界真正结构的时候了。

空间的曲率由物质密度偏离其临界值的程度来决定，偏离越大曲率越大。观测表明即使物质密度与其临界值不同，空间的弯曲也不明显，只有大于几十亿光年的距离时曲率才变得显著。在闭宇宙空间里的最短路径——测地线——是封闭的，就像球面上的大圆（例如像赤道）。沿着这条路径飞行会回到出发点，就像沿着赤道的环球旅行会到达出发地一样。

未来的观测可能会证实物质密度大于临界值而宇宙是闭的，宇宙的体积则是有限的然而极其大。宇宙是巨大的，宇宙"赤道"也就是环绕宇宙的测地线的长度肯定不会小于几百亿

光年,很可能还要大得多。

当然有同样的根据预期物质密度不超过临界值,宇宙的体积就是无限的。

下一节我们会看到开宇宙和闭宇宙的差别并不像初看那样富有戏剧性。

视　界

宇宙在大约150亿年前开始膨胀。因此宇宙中没有一个物体的年龄可以比150亿年更大,而且没有一个光源的辐射持续的时间可以超过150亿年。这个极限蕴含一个非常重要的推论:星系越远,光到达观测者所需的时间就越长。今天观测者记录的光在很久以前才离开星系。宇宙在大约150亿年前开始膨胀,即使在膨胀开始时光立即辐射也只传播了有限的距离,约为150亿光年。空间中离我们的距离为这个值的所有点组成了所谓视界。在视界以外的宇宙区域原则上是不可见的,不可能看到更远的星系。不管望远镜多么好,从视界以外的星系来的光没有足够的时间到达。当观测逐渐近于视界的天体时,光的"红移"无限地增加。在视界上"红移"是无穷。结论是我们只能看见宇宙中有限数量的恒星和星系。

在膨胀宇宙的理论被提出之前,描绘均匀地充满恒星的无限宇宙的尝试遇到过一个不平常的详谬。问题是这样指出的:在一个充满恒星的无限宇宙中,任何视线方向都不可避免地会看到一些恒星发亮的表面,这样整个夜空一定会因太阳和恒星的表面亮度而发亮。

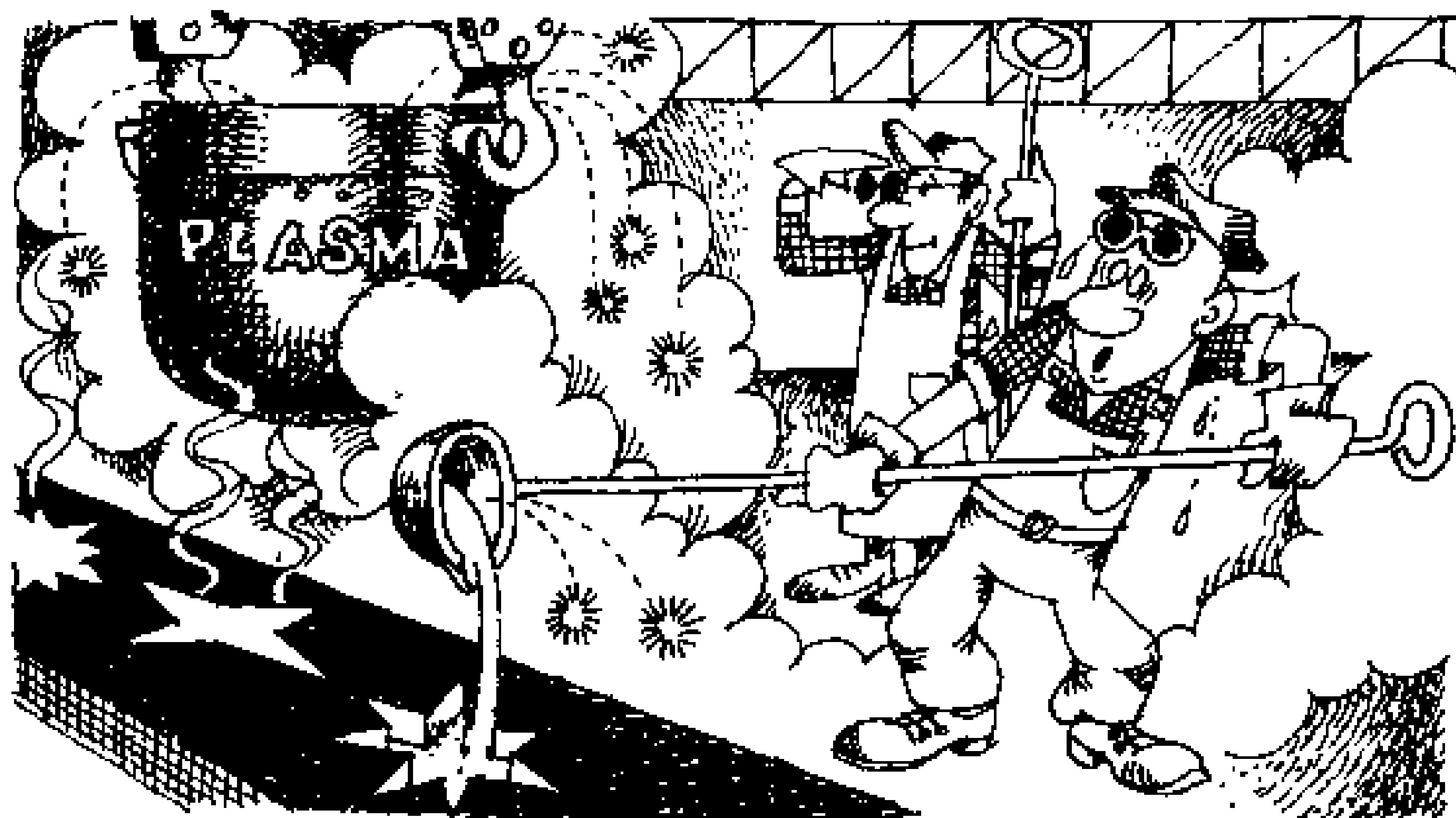
这是著名的测光详谬。许许多多一流的头脑试图去解决它。

膨胀宇宙理论自动解决了这个问题。膨胀宇宙中的每一个观测者有他自己的视界,因此观测者看到有限多个恒星稀疏地分布在空间里。视线可以从恒星旁穿过一直到视界而碰不上恒星,恒星间的夜空可以是黑的。此外,恒星的寿命是有限的。

由于存在视界,闭宇宙和开宇宙的差别并不很重要。两种情况下,我们都只能观察到宇宙的一部分:半径约为150亿光年的球。在闭宇宙里光不会绕行整个世界再回到今天的观测者,显然我们不可能接受到银河系辐射的并绕宇宙一整圈后的光。闭宇宙并不容许人们看到自己的后背。即使在从奇点开始膨胀到收缩开始的整个时间段内,光只能覆盖闭空间的一半,只有在收缩阶段才能完成环行。

无论观测者在哪里,他都有自己的视界。均匀宇宙中的所有点都是等价的。随着时间的流逝,每一个观测者的视界在变大,他会接受到宇宙新区来的光。经过100年,视界变大了大约一亿分之一。

要作一点补充说明。原则上在视界附近看到的物质是处于极其遥远的过去的状态,那时它的密度比现在要大得多。物质还没有分离成个别的天体,而且不容许辐射透过。以后还要讨论这个问题。



3. 热 宇 宙

膨胀开始阶段的物理

前面两章向读者介绍宇宙膨胀的力学。实际上早期宇宙发生了大量的物理过程。力学并不是仅有的有趣的方面。150 亿年前在大爆炸发生的时候，物质的密度极端地高，那时的物理和现在看到的很不相同。这些过去的物理过程决定了世界今日的状态，在很多事件中也包含了出现生命的可能性。

膨胀过程的物理是极其令人关注的焦点，然而对于这些过程我们真的能说些什么吗？这是一个合理的问题，因为说的是膨胀才开始的时刻，而那是在 150 亿年之前。

事实上我们真的能推断出一些结论。

在大爆炸前几秒发生的过程对今日宇宙有重要影响，留

下的痕迹如此显然，以至于可以重建这些过程，这是问题的关键。

在这些过程中最重要的是在极高的粒子密度状态时初等粒子间的核反应，这种核反应只可能于膨胀刚开始时在极高密度的情况下发生。当然没有中性的原子或者复杂的原子核可以在此时形成。作为核反应结果的化学元素也要在晚得多的时间后形成。然而，还有一个形成初等粒子的较早的时间段。这种时间间隔是以不可思议的短时间 10^{-43}秒为单位来度量的，那时的密度超过 10^{93}克/立方厘米。这个密度值要比原子核的密度大上许许多多倍，后者仅仅是 10^{15}克/立方厘米。这个令人惊讶的数字可能会使读者的脸上流露出讥讽的笑容。在地面实验室完全不能实现的条件下难道人们能指望收集到关于这个物理过程的任何信息吗？

多年以前，察尔多维奇和我在写一本书，我们研究在这种极端高密度下发生的物理过程的分类，我们想起阿卡迪·阿伏琴柯（Arkady Averchenko）写的一段趣文："米甸人(Midianites)的历史晦暗而空白，然而历史学家却分成了三个阶段：对于第一阶段我们一无所知，对第二阶段我们知道的几乎和第一阶段一样多，第三阶段是排在前两个后面的阶段。"

从那时到现在的 20 年里，物理学走了长长一段路，即使对膨胀宇宙中初等粒子形成的物理我们也知道了不少。

我们可以完全确定地描绘在大爆炸后的前三百分之一秒内发生的核反应。关键是核反应导致了宇宙中化学元素的形成。

核反应的计算使得有可能预报星系、恒星和星际气体的

化学组成,将预报和观测作比较就可以证认这些核反应,最重要的是澄清产生这些核反应的物理条件。现在暂时不讨论在密度为 10^{93}克/立方厘米时发生的奇异过程,先来看宇宙头几秒中的核反应及其后果。

开始时是冷的还是热的

原则上物质在宇宙中开始膨胀的条件可能有两种不同的图像。物质要么是冷的,要么是热的。下面会看到两种情况涉及的核反应导致绝然不同的结论。历史上首先考虑的是冷启动的图像。在 20 世纪 30 年代,核物理学才刚刚开始,并没有理论可以用来可靠地计算核反应,那时假定宇宙物质开始时是由冷中子组成的。

后来发现这个假定导致与观测的矛盾。

情况是这样的:中子是不稳定的粒子,当它处于自由状态时,大约 15 分钟内就会衰变成一个质子、一个电子和一个反中微子。因此,当宇宙膨胀时,中子不可避免地在衰变,质子要出现。一个刚诞生的质子会和一个残余的中子结合而形成氘原子核。氘核很快与另一个氘核结合并一直进行下去。这种逐步形成更复杂原子核的反应很快进行下去直到形成 α 粒子(氦原子核)。计算表明实际上永远不会形成更复杂的原子,整个物质会转变成氦。这个结论与观测大相径庭。我们知道年轻的恒星和星际气体大都由氢组成而不是氦。

自然界中关于化学元素的测定完全否定了宇宙膨胀冷启动的假说。

1948 年乔治·伽莫夫(Geoge Gamov)发表了一篇论文,提出膨胀初始阶段的热图像。此后他和他的同事拉尔夫·阿尔

弗(Ralgh Alpher)及罗伯特·赫尔曼(Robert Herman)又撰写了好几篇论文,都假定在膨胀开始的时候温度极端地高。

热宇宙图像的作者们的主要目标是分析宇宙膨胀开始时的核反应,并且得到现在观测到的各种化学元素及其同位素的丰度比例。

为什么那时要假定所有的化学元素必须在宇宙膨胀开始时合成呢? 事实是在 20 世纪 40 年代把大爆炸错误地定在 10 亿~40 亿年以前,而不是现代的估计值 150 亿年。现在知道错误来自低估了星系的距离从而高估了哈勃常数。把 10 亿~40 亿年这个数值和地球的年龄 40 亿~60 亿年相比较,伽莫夫和他的同事得出结论说地球和其他行星一定是由原始物质形成的,更不用说太阳和其他恒星了,而且所有化学元素在宇宙膨胀的早期形成,它们不可能在以后形成。

现在知道宇宙膨胀的开始时间是 150 亿年前,地球不是由原始物质形成的,而是在恒星的核反应(核聚变)阶段由生成的物质形成的。恒星核聚变的理论成功地解释了化学元素丰度观测的主要部分,基于假定原恒星是由主要为氢和氦的混合物组成的物质形成的。老的第一代恒星的饱含较重元素的物质被抛射到了空间,新的恒星和行星从这种物质中生成。这样要在膨胀早期阶段解释所有元素(包括像铁、铅等重元素)起源的需求就不复存在,但是关于热宇宙的主要想法被证明是正确的。

许多研究者指出银河系的恒星和气体中氦的成分大大高于用恒星核聚变所能解释的比例(以后还要讨论细节)。这表明氦聚变一定发生在膨胀的早期,然而宇宙占主导地位的元素过去是,现在仍然是氢。

伽莫夫和他的同事提出的理论表明宇宙在膨胀中的物质由氢(占70%)和氦(占30%)的混合物组成,就是这种物质后来形成了恒星和星系。是什么阻止了热宇宙中的物质像冷中子液体那样转换成氦呢?

关键的因素是物质的炽热状态。炽热物质包含许多高能光子,也包含质子和中子趋向于组成氘核。光子击碎了成对的质子和中子组成的氘原子核,在氦聚变反应链的开始阶段就中止了反应。当膨胀中的宇宙足够冷却后(到温度小于100万度),一定数量的氘得以残存并形成氦。后面还要详细讨论这一过程。

热宇宙图像对构成恒星的物质中氦的比例作了明确的预报,前面已提到氦的丰度必须是全部质量的大约30%。

伽莫夫的假说并不是处理大爆炸的最后一个方案。在20世纪60年代初,另一个方案革新了冷宇宙图像。新版本预报所有物质不是转换成氦(如前一版本那样),而是转换成纯氢。它也假定恒星中的其他元素是很久以后才形成的。

早先,热和冷的宇宙模型都试图详尽地解释构成恒星的物质中的元素丰度。决定哪一种理论是正确的主要根据曾经是关于化学元素丰度的观测资料的分析。不幸的是这类观测,特别是它们的分析极其复杂并依赖许多假设。如果宇宙中化学元素的丰度是检验理论的惟一根据,很难弄清真理在哪一方。事实是很难确定在恒星的核反应过程中聚变而成多少氦和多少其他元素,也很难确定有多少是在早期宇宙中出现而留下来的。

幸运的是出现了另一种测试方法。热宇宙理论给出一种最重要的观测预报,它是高温的直接推论。这是关于今日宇

宙仍然存在的一种电磁辐射的预报，这来自物质处于稠密和炽热的时代。

在宇宙膨胀过程中物质温度在减少，辐射也因冷却而停止，然而温度在绝对温度20度～30度范围内(取决于不同的理论版本)的电磁辐射直到今天应当仍然存在。

如果在演化的早期宇宙是热的，慢慢冷却的辐射称为宇宙微波背景辐射。苏联天体物理学家史克洛夫斯基建议称为残余辐射。在这种低温下的电磁辐射由厘米和毫米波段的无线电波组成。宇宙曾经是热的还是冷的取决于对这种辐射的搜寻。这是关键性的实验，如果找到了，宇宙曾是热的，否则是冷的。

微波背景辐射是怎样被发现的

发现微波背景辐射的历史很有启发性。伽莫夫、阿尔弗和赫尔曼的先驱工作已经指出热宇宙的早期会留下辐射，它现在的温度可能是绝对温度5度(今后用K表示绝对温度的度数，例如这里的温度是5K)。

似乎这个预报一定会吸引天体物理学家的注意，并会把这条新闻告知射电天文学家，请他们来设法检测所预报的辐射。

这类事并没有发生。科学史学者和专家们仍然为没有人有意识地去搜寻微波背景而感到困惑。在进行有关的猜测之前，让我们先来追踪一系列导致发现的实际事件。

在1960年，美国贝尔实验室的科学家建造了一个射电波天线，用来接收从回声1号卫星反射回来的信号。到了1963年，已不再有必要用这个天线观测卫星了。贝尔实验室的两

个无线科学家罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)和阿诺·彭齐亚斯(Arno Penzias),决定用这个天线来作射电天文观测。天线是20英尺的喇叭状反射器,有一个最新型的接收器,这个射电望远镜在当时是世界上测量来自大范围天空的射电波强度的最敏感的仪器。原来想用这个望远镜来测量银河系中星际介质生成的辐射。预期这个工作是有意思的,但有点常规工作的味道,是许多射电天文观测中的一个。彭齐亚斯和威尔逊无论如何没有想到去搜寻宇宙开始膨胀时的辐射,他们完全不知道关于热宇宙的理论。

第一次测量设计在7.35厘米波长进行。

准确测量银河射电辐射需要考虑所有可能的噪声。无线电噪声可能有各种类型。它来自地球大气对无线电波的反射,也来自地球表面的无线电辐射。在天线、放大器电路和接收器里电子的运动会产生附加的噪声。所有可能的噪声源都要加以仔细的分析和考虑。

彭齐亚斯和威尔逊出乎意料地发现不管如何努力消除噪声,天线总是记录下强度与望远镜指向无关而保持不变的辐射。这种噪声不可能是来自银河系的辐射,否则当天线的指向沿着或垂直于银河系平面时辐射强度应当不同,而且离我们最近的类似银河系的星系也会在7.35厘米波长上有辐射,但并没有发现这样的辐射。

还剩下两种可能的解释:要么这是一个至今未被证认的干扰源的"噪声",或者是太空里来的辐射。曾经猜疑这种噪声和天线有关,引起了所谓天线之谜。现在我转述测量者之一罗伯特·威尔逊的描述,说彭齐亚斯和他是怎样去寻找天线的噪声源的。

> 这样我们看来就得把天线当作附加噪声的来源了……天线里发生损耗最多的部分是小直径的入口处,它用电铸铜做成。我们曾经在实验室里测量过类似的波导,并且改正了由于这些波导不完善的表面情况而产生的损耗。天线的其余部分是由铆在一起的铝片构成的。虽然我们认为那里不会有问题,我们只能去估测铆接处的损耗。一对鸽子在喇叭状天线里做了窝,它们从那里进入温暖的家。它们用城市居民熟悉的那种白色材料涂到内壁上。我们赶走了鸽子,清理了它们留下的垃圾,但是天线温度只减少了一点点。
>
> 有那么一段时间我们生活在天线温度问题的阴影中。
>
> 1965年的春天,在流量测量工作结束后,我们全面地清洁了20英尺喇叭状反射天线,并且用铝带盖住了铆接点,结果是天线温度降低很少。我们也拆卸了天线的入口部分,作了检查,发现它一切完好。

由此,射电望远镜检测出来的附加辐射不是源自天线的噪声,它来自宇宙,在观测的任何方向上强度相同。

导致发现这个谜团答案的后来的事件很大程度上是偶然的。彭齐亚斯在和他的朋友勃尔克(Burke)谈一些其他事情的时候,偶然提到了他们的天线检测到的神秘辐射。勃尔克

记得皮伯斯的一次报告,皮伯斯当时在普林斯顿(Princeton)大学的一位杰出物理学家罗伯特·迪克(Robert Dicke)的实验室里工作。勃尔克说皮伯斯谈到过早期宇宙的温度约为10K的残余辐射。

彭齐亚斯用电话和迪克联系,两个小组见了面。迪克和他的同事皮伯斯、罗尔(Roll)和威肯逊(Wilkinson)认识到彭齐亚斯和威尔逊已经发现热宇宙的原始辐射。迪克领导的普林斯顿小组那时正在制造用来在3厘米波段进行类似测量的仪器,但还没有开始实际测量,彭齐亚斯和威尔逊却已经发现了。

威尔逊叙述以后的事件如下:

> 我们同意在天体物理杂志上并排发表两篇快讯。一篇是普林斯顿(迪克等,1965)的理论,另一篇是贝尔实验室对天线附加温度的测量。在我们的快讯里阿诺和我小心地不谈到背景辐射的宇宙学起源,因为我们没有做过这方面的工作。我们还想,我们的测量与理论无关,其生命可以持续更久。我们为天线里的神秘噪声有了一种解释而感到欣慰,特别是这是一种重要的宇宙学解释。我们保持着谨慎而乐观的情绪。

两篇论文于1965年夏天刊出。

彭齐亚斯和威尔逊的先驱工作表明微波背景辐射的温度接近于3K。

在以后的年代里在各种波段进行了定量测量，波长从几十厘米到亚毫米。

观测揭示微波背景辐射的谱服从普朗克(Planck)公式，就像具确定温度的辐射应有的谱那样，这一温度微微低于3K。

就是以这种偶然的方式，彭齐亚斯和威尔逊作出了20世纪的一个重大发现，证明了宇宙在膨胀开始时是热的。在1978年，他们因该发现而获诺贝尔物理学奖。

为什么不更早一些发现微波背景辐射

让我们回到这个属于科学史的问题，它至今仍然吸引物理学家和天体物理学家。美国伟大的科学家斯蒂芬·温伯格(Steven Weinberg)在他的书《最初的三分钟：宇宙起源的现代观》中写道：

> 这里我特别要讨论一个历史问题，我发现这个问题既困惑又奇妙。1965年检测到的宇宙背景微波辐射是20世纪最重要的科学发现之一。为什么它的发现一定是个偶然的事件？换种方式问，为什么在1965年前没有系统地搜索这种辐射。

我要提醒读者，在彭齐亚斯和威尔逊的发现的15年前，伽莫夫预报宇宙充满温度为绝对温度几度的辐射，那是在20世纪40年代末和50年代初。

难道是那时不存在能够检测这种辐射的足够灵敏的射电

望远镜吗？以后会看到这不太能成为理由。温伯格表示了同样的看法。问题的关键不在这里。

物理学给出许多例子，表明在技术上能实现检测的很久以前，对一种新现象就已经作了预言。然而，如果预言有坚实的基础而且是重要的话，物理学家就不会让它逃出视线。在技术检测的可能性实现之后，通常会立即对预言进行测试。温伯格用20世纪30年代对反质子（氢原子核的反粒子）的预言作为一个例子。在那时物理学家无法梦想拥有一种设备来从实验上发现反质子。然而到了20世纪50年代，技术上可能了，在伯克利（Berkely）建造了一个特别的加速器来测试这个预言。

可是对于宇宙微波背景，直到20世纪60年代中期之前，射电天文学家一无所知，也不知道检测它的可能性。

事情怎么会是这样的呢？

温伯格给出三个理由。第一个理由是热宇宙理论是伽莫夫及其同事提出来的，为的是用膨胀的甚早期的核聚变来解释自然界中所有化学元素的丰度。像在前一节里提到的那样，因为重元素是在恒星内聚变而成的，他们的假定不能成立，只有最轻的元素可以追溯到膨胀最早的时候。理论的第一个版本还包含其他一些不尽如人意之处。后来所有的缺点得到了改正，但在20世纪40年代末和50年代，这个理论就整体来说不被认为十分可靠。

第二个理由是理论家和实验家之间缺乏交流。前者完全不知道是否可以用现有的观测设备来检测微波背景辐射，后者从来没有听说过要去搜寻这种辐射。

第三个理由是心理上的。物理学家和天体物理学家极难

接受讨论膨胀开始几分钟的计算是一幅真实的图像。时间间隔的对比确实太大了：早期的几分钟对着以后的几百亿年。

另一个理由，也是我认为的最重要的理由，是彭齐亚斯在他的诺贝尔讲演中提到的。问题是伽莫夫及其合作者在他们的第一篇和后来的文章中都没有提到过能够检测宇宙背景辐射，哪怕是原则上提一下也好，而且看上去伽莫夫等认为检测是完全不可能的。彭齐亚斯说：

> 至于检测，他们认为辐射主要表现为一种能量的增加。它对射到地球上来的整个能量流量的贡献可能为空间宇宙线和星光所掩盖，它们都有相近的能量密度。在1948年伽莫夫写给阿尔弗的一封信(未出版，阿尔弗慷慨地从他的档案里找出来给我)中表露了他的观点：这三种近似相等的附加能量的效应无法分离。伽莫夫写道："大约5K的空间温度可以用现在恒星的辐射来解释(碳循环)。我们能知道的惟一的一件事是原始的热宇宙的残余温度不会高于5K。"他们显然不知道残余辐射独特的光谱特点可以把这种辐射和其他效应分离出来。

在这个故事以后的发展中我也扮演了一个角色。在20世纪60年代初我开始从事宇宙学方面的工作。我那时刚在莫斯科大学修完了研究生课程，学术上的导师是泽马诺夫教授。我的导师的主要兴趣是在当不作任何均匀分布的简化假设时，宇宙模型中的质量的及运动力学。他对膨胀宇宙中特

定的物理过程不那么有兴趣，而那时我对热宇宙模型一无所知。

就在我的研究生阶段即将结束之前，我为以下的一个问题所吸引。我们知道不同类型的星系是用电磁辐射的不同波段来研究的。有了星系在过去演化的假设，考虑了由于宇宙膨胀遥远星系光线的增红，人们能够计算星系辐射对波长的分布。在计算时，人们必须记住恒星不是仅有的辐射源，许多星系是米波和分米波段的强射电源。

我开始作必要的计算。在完成了研究生学习之后，我参加了察尔多维奇教授的研究小组，我们的兴趣集中在宇宙中发生的过程的物理上。

所有的计算是和多罗斯柯维奇合作进行的。结果是得到了星系辐射的谱，也就是当仅仅考虑星系诞生时和恒星开始发光时的辐射后那些一定会充满今日宇宙的辐射。这个谱分布预告了在米波段(这个波段来自射电星系的强辐射)和可见光波段(恒星是可见光的强辐射源)的高辐射强度，而在厘米、毫米以及更短些的电磁辐射波长范围内辐射一定会弱得多。

因为热宇宙和冷宇宙的图像在我们的小组(由察尔多维奇、多罗斯柯维奇和我组成)中热烈地讨论过，在多罗斯柯维奇和我准备发表的论文中把早期宇宙的残余辐射(如果它确实是热的)加到整个辐射中去。热宇宙辐射预期是在厘米和毫米波段，因此正好填入星系辐射是弱的那个波长范围中去。由此，残余辐射(只要宇宙曾经是热的！)被预报要比宇宙中已知的辐射源在这个波段的辐射要强得多，强几千倍甚至几百万倍。

因此，这个背景辐射可以被观测到！尽管微波背景辐射的全部能量与星系辐射的可见光能量大致相当，残余辐射发生在完全不同的波段因而可以观测到。下面是彭齐亚斯在他的诺贝尔讲演中谈到的我和多罗斯柯维奇的工作：

> 第一个在刊物上提出残余辐射是可检测的微波现象的是题为《总星系辐射的平均密度和相对论宇宙学中的一些问题》的一篇短文，由多罗斯柯维奇和诺维科夫在 1964 年春天发表。虽然同一年在广泛订阅的期刊《苏联物理学公报》上登载了其英文译本，看来它仍然未引起在这一领域中工作的其他专家的注意。这篇杰出的论文不仅指出残余辐射的谱是黑体微波现象的谱，而且明确指出贝尔实验室在克拉福特山(Crawford Hill)上的 20 英尺喇叭状天线是检测辐射的最合用的仪器。

我们的论文没有引起观测者的注意。彭齐亚斯和威尔逊没有注意，迪克及其合作者在 1965 年发表自己的论文以前也不知道它的存在。彭齐亚斯几次告诉我这有多么不幸。

我们还没谈到多次失之交臂的发现残余辐射的机会。

现在知道早在 1941 年就可能发现微波背景辐射。加拿大天文学家麦克勒尔(MacKellar)是发现星际空间分子的天文学家之一。他用下面的方法来分析星际气体。如果星光传播时经过了星际气体云，气体中的原子和分子会在确定的波长处吸收恒星的光，造成在光谱中出现星际气体的吸收线。

在光谱中谱线的位置取决于是什么元素或是什么分子造成了吸收，也取决于原子或分子的状态。

在1941年，麦克勒尔分析来自蛇夫座ζ的星光的光谱。吸收线是由氰分子(碳和氮的化合物)造成的。麦克勒尔得出结论说，在光谱的可见光部分的这些谱线只可能是旋转的氰分子吸收而形成的，而且这种旋转一定是在温度约为2.3K的辐射激发所致。当然在那时无论是麦克勒尔还是其他人都没有想到分子的转动是残余辐射激发所致的可能性。事实上，那时甚至热宇宙的理论还没有诞生！

只是在发现了宇宙微波背景之后，史克洛夫斯基、费尔德(Field)、希区柯克(Hitchcook)、沃尔夫(Wolf)和泰德乌斯(Thaddeus)在1966年和以后发表论文证明在蛇夫座ζ星和其他3颗恒星的光谱中观测到的星际氰分子的转动确系由残余辐射所激发。

这说明了在1941年就已经观测到了微波背景辐射的间接效应：对星际氰分子旋转状态的作用。

然而这还不是故事的最后一章。让我们回到检测宇宙微波背景在技术上可行性的问题上来。在什么时候这才成为可能呢？温伯格写道："很难准确地确定这一点，但我的实验同事告诉我早在1965年的很久以前就可以做这种观测，可能在20世纪50年代中期，或甚至在20世纪40年代中期。"这正确吗？

在1983年的秋天，我过去不熟悉的物理所的叙马诺夫(Shmaonov)给我打电话，说是希望和我谈谈宇宙微波背景辐射发现的事。我们在当天见了面。叙马诺夫讲述在20世纪50年代中期，他在苏联著名的射电天文学家凯金(Khaikin)和

凯达诺夫斯基(Kaidanovsky)的小组做研究生阶段的研究。他测量来自空间的3.2厘米波长的无线电波。测量所用的仪器也是喇叭形的天线,很类似于多年以后彭齐亚斯和威尔逊所用的那种。叙马诺夫小心地研究了噪声的可能来源。当然他的仪器的灵敏度不如美国天文学家在20世纪60年代所用的那种。叙马诺夫得到的结果在1951年写入了他的博士论文,并且在苏联期刊《仪器和实验方法》上发表。测量的结论是:"背景辐射的绝对有效温度……是4±3K"。叙马诺夫强调了辐射强度与方向和时间无关。叙马诺夫测量的误差是大的,他的4K估计值是完全不可靠的,然而我们现在认识到他所记录下来的正是宇宙微波背景辐射。不幸的是,叙马诺夫本人、他的导师和其他看到他测量结果的天文学家都一点不了解存在残余辐射的可能性,也就没有对结果给予应有的注意。这些结果很快就被忘却。当多罗斯柯维奇和我在完成我们的计算之后,于1963年和1964年间过几个苏联射电天文学家:"你听说过有谁在厘米和更短的波段做过宇宙背景辐射的测量吗?"他们之中没有一个人记得叙马诺夫的工作。

甚至做这些测量的人也不了解结果的意义,不仅在20世纪50年代(这容易解释),而且是在彭齐亚斯和威尔逊于1965年发现微波背景辐射之后,这多少有点滑稽。确实如此,那时叙马诺夫在完全不同的一个领域工作。一直到1983年他在回答一个有点偶然的评论时,才回顾他过去的结果,叙马诺夫在苏联科学院物理与天体物理学部作了关于这个课题的报告。这件事发生在他作测量的27年之后,也是彭齐亚斯和威尔逊结果发表18年之后。

然而这仍然不是最后一章。在我完成本书的草稿时,我得悉日本射电天文学家于20世纪50年代初可能也检测到了背景辐射。这个工作和叙马诺夫的工作一样没有引起注意,以后也无人记得,实际上在科学家中不为人所知。

命运会有不可预期的和弯弯曲曲的转折。然而,整个故事很有教育意义。看到了现象不等于发现了这个现象。你必须理解这个发现的意义并给出正确的解释。毫无疑问,环境和运气的组合的确在此起了作用。然而,成功并不来自偶然,成功要求许许多多的工作,要求广博的知识,要求持之以恒,要求耐心地让结果得到其他人的注意和承认。

通向遥远过去的航行

宇宙微波背景辐射与恒星的光和星系中辐射的无线电波不一样,它并不来自离散的辐射源。自宇宙开始膨胀以来背景辐射就一直存在。它包含在从奇点开始膨胀的热物质中。

如果我们计算宇宙微波背景辐射携带的总能量密度,会发现它是恒星、射电星系和其他源合在一起的辐射的能量密度的30倍。计算得到背景辐射光子的数量是宇宙中每立方厘米500个。

你会记得宇宙中普通物质的平均密度是大约10^{-30}克/立方厘米。这表明如果把物质均匀散布到空间中去,1立方米中可能只有1个氢原子。氢是宇宙中至今存在的最丰富的元素。与此同时,1立方米中大约包含10亿个背景辐射的光子。

因此电磁波的量子,这些不平常的粒子在自然界中数量

要比普通物质大得多。有一个像质子这样的重粒子就有10亿个残余的光子。在氢之外如果还计及其他化学元素(它们的原子核内除了质子还有中子),这种估计没有实质的变化,因为氢是自然界中的主要元素。再重复一下,一个重粒子就对应有10^9个光子。

我们知道今天星系际空间中每立方厘米就大约有500个光子以最大的速度沿所有的方向传播。每一个光子的能量与它的频率相对应。在温度为3K时,在多数情况下,每一个光子有10^{-15}尔格的能量。因此,每立方厘米中包含宇宙背景辐射的能量等于10^{-15}尔格乘以500,即5×10^{-13}尔格。按照爱因斯坦的质能关系,这一能量相当于5×10^{-34}克的质量,从而得出微波背景辐射今天的质量是5×10^{-34}克/立方厘米。

回忆一下普通物质密度的平均值为10^{-30}克/立方厘米,物质的质量因此要比微波的质量大上2000倍。尽管光子的数量密度要大得多,就质量而言,普通物质远比宇宙微波背景辐射多得多,后者的质量可以忽略。

让我们来看在过去这两类粒子的命运。

在我们能了解的过去没有一种粒子会诞生或消失。这里有必要做些澄清。

第一类粒子涉及宇宙背景辐射的光子。今日的宇宙对微波辐射实际上是透明的,很清楚,今日宇宙中的残余光子不会和物质相互作用,因而其数量不会改变。在十分遥远的过去,物质的密度高,温度也高,宇宙中的物质电离化了形成均匀的等离子体,那时它对辐射来说是不透明的。背景辐射的光子大量地与物质相互作用,然而在任何一个短时间段内,热物质

创造的光子和其内部吸收的光子一样多。正如物理学家所说，辐射和物质相互间处于平衡态。因此，在那时一个质子和10亿个残余光子之比仍然成立。

要澄清的第二点是关于质子。

在遥远的过去宇宙非常之热，在刚刚开始膨胀时，在超过10万亿度的高温下，粒子间的碰撞产生了质子和它们的反粒子反质子，以及中子和反中子，后面还要讲述这些过程。只要不去管最初那奇异的几分钟，我们能够假定背景辐射光子和重粒子既不会产生也不会湮灭。

记住了这一点，我们来开始通向过去的航行。当然，两类粒子的数密度比今日高，但随着我们更深地走向过去，这些密度以相同的速率增长，它们的比值保持不变：1个质子对10亿个光子。

然而，光子和重粒子之间存在巨大差别。重粒子的质量保持不变，而当宇宙膨胀时"红移"减少了光子的能量。当能量变化时，每一个光子的质量也变化了(它的质量与其运动能量完全相关)。每一个光子在过去有更大的能量，也就有更大的质量。

在过去的某一时刻，10亿个光子的质量(越在过去它们就越大)变成等于一个质子的质量。

这是这样的一个时刻，那时每立方厘米中普通物质和背景辐射的质量相等。这一事件发生时物质密度(辐射密度此时与它相等)是10^{-20}克/立方厘米，物质和辐射的温度是6 000K。宇宙背景辐射那时是以可见光而不是以无线电波的形式。当然那时并没有个别的天体，它们要晚得多才形成。再早些时候又是一幅什么图像呢？

再早些时候，宇宙背景辐射具有比普通物质更大的质量！

确实，这是一种非常不寻常的状态。我们称之为光子等离子体的时代。

下文中要描述的内容可能就像科学幻想电影。我们计划逼近膨胀开始的时刻，只差一个可以完全忽略的时间间隔，我们将见到极端异常的过程。

在膨胀的早期，宇宙中物质质量的主要部分是光的质量；在分析这个阶段的时候，可以合理地暂时忘却在光量子以外的可忽略的普通物质添加物，虽然现在这种物质占据着主导地位：恒星、行星和我们自己都由它组成。

让我们继续通向奇点的旅行。例如，在膨胀开始后1秒时温度是1000万度。再早一些时候温度更高。在这样高的温度下，初等粒子产生和湮没。例如，高能质子的碰撞产生的电子—正电子对，而电子与正电子的碰撞导致湮没并产生光子，就是光量子。

为了产生一对电子—正电子，必须消耗的能量至少等于这两个粒子的质量之和乘以光速的平方（$E = mc^2$），因此这样的过程只能在温度超过100亿度时才能进行，那时许许多多光量子具有这样的能量。电子和正电子的碰撞也会产生中微子—反中微子对。类似地，中微子和反中微子的碰撞会产生电子—正电子对。在更高的温度下，可以产生质量更大的粒子：质子和反质子、中子和反中子、介子等等。

在温度超过10万亿度时，大量的粒子族（还有相同数量的反粒子）以几乎相等的丰度共同存在，在宇宙膨胀的时候，温度降低以至于粒子的能量已不足以产生像质子和反质子那样重的粒子和反粒子对。这些粒子“灭绝”了。

在温度进一步降低后，许多介子族也“灭绝”了。

在膨胀开始大约 0.3 秒后，十分重要的事件发生了。那时的宇宙包含光量子、电子和正电子、中微子和反中微子（为了简单起见，只提及仅仅一种中微子，即电子中微子）。

在高温下，中微子和反中微子转换成电子和正电子，相反的过程也会发生。

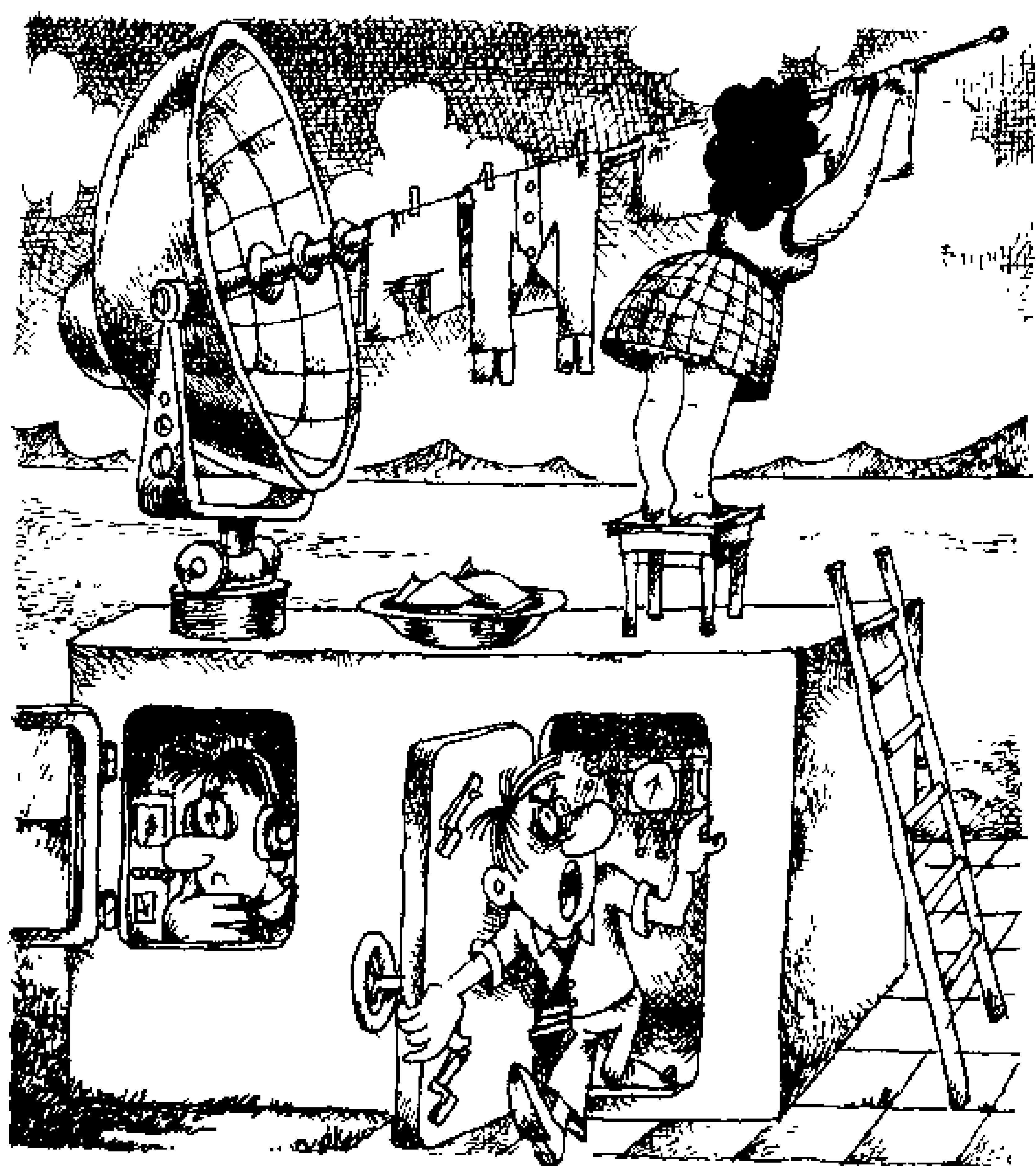
然而，中微子是和其他物体很难发生反应的粒子，稠密的物质对它们来说实际上是透明的。在大爆炸之后大约 0.3 秒，包括电子和正电子在内的整个宇宙物质对中微子来说是透明的，亦即它们不和其余的物质发生反应。在这之后它们的数目不会改变，而且一直生存到现在。它们的能量因“红移”而减少，就像电磁辐射量子的温度因“红移”而降低的情况一样。

我们的结论是在宇宙微波背景之外，宇宙现在一定也有残余的中微子和反中微子。这些粒子的能量一定近似等于现在宇宙电磁背景辐射量子的能量，它们的浓度也和残余量子的浓度几乎没有差别。

用实验检测残余的中微子会是极其有趣的事。在大爆炸后不到 1 秒的时间之后，宇宙对于中微子实际上是透明的。检测到了中微子，就有可能获取这些粒子携带的信息，直接地看到宇宙遥远的过去。

很不幸，我们预期的残余中微子的能量非常之低，以至于在可见的将来对它们的检测是不能实现的。

与此相关，应当提到中微子天文学现今正在诞生之中。系统地分析太阳内部核反应产生的中微子流的时代刚刚开始。这些中微子让我们看到太阳的中心，因为太阳的全部物



质对中微子来说是完全透明的。由中微子造成的太阳的“X射线”能提供有关太阳内部结构的信息。类似地，天体物理学家在未来将试图建立整个宇宙的“中微子射线”。

这样我们就了解了大爆炸后1秒钟内物质和辐射的演化。虽然计算在膨胀的每秒内发生的过程似乎是天方夜谭，

现代物理学却能完全可靠地做到这一点。

前 5 分 钟

一首苏联电影中的老歌唱道：

> 5 分钟，5 分钟，
> 如果好好地对待它，
> 就在这 5 分钟里，
> 可以完成许许多多……

我们宇宙生命的前 5 分钟决定了宇宙的特性，包括几十亿年后的今天的宇宙的特性。

在上面提到的最初的时刻之后，充满着可怕的核力的前 5 分钟中发生的物理过程决定了今日宇宙中化学组成的重要特性。

由于这些过程，恒星储存了足够的核能。恒星的发亮也是膨胀的前 5 分钟里宇宙中占统治地位的剧烈过程的结果。

恒星和其他天体来自普通物质，这类微量的添加剂是在上一节讨论光子和粒子——反粒子时我们曾予以“忽略”的。

现在让我们回到这些微量的普通物质添加剂，在膨胀开始不到 1 秒钟以内可以在中微子和反中微子、电子和反电子、光量子的“沸腾汽锅”内找到这些物质。已经证明涉及普通物质的过程对膨胀前几秒的条件非常敏感。这些过程决定了在很久以后产生星系和恒星的物质的化学组成。结论是恒星物质的化学组成是宇宙膨胀开始时的物理条件的极端敏感的指示器。

让我们来看一下普通物质参与的物理过程，它们处于什么状态呢?

首先，在温度超过 100 亿度时，不存在中性的原子：物质完全电离了而形成高温的等离子体。在这种温度下也不可能有复合的原子核，它们会被周围的高能粒子撞成碎片。物质的重粒子因此是中子和质子。这些粒子在“沸腾汽锅”中经受着高能的电子、正电子、中微子和反中微子的冲击。

和这些粒子的相互作用，迫使中子和质子快速地相互转换。这些反应建立了质子和中子的平衡。在温度足够高时(超过 1 亿度)，中子和质子的浓度近似相等。

随着宇宙的膨胀和冷却，质子占据的比例增加而中子减少。它们的浓度不再相等，因为中子的质量比质子的质量大，以至于质子的形成要有利得多，也就是说形成一个质子的概率要比形成一个中子的概率大。如果在大爆炸后这种核反应持续比几秒更长些，在几十秒后中子占据的比例变得可以忽略。

实际上核反应极其依赖于温度。随着温度下降，反应率减少，在膨胀开始的几秒之后实际上反应停止。中子的相对丰度“冻结”在所有重粒子的 15%左右。

在温度下降到 10 亿度后，能形成最简单的复合核。量子和其他粒子的能量已不足以瓦解复合核。所有的中子都被质子俘获而形成氘核，以后涉及氘核的反应产生氢原子核，同时也形成极少量的^{3}氦同位素，氚和锂核。

在这些条件下实际上不会形成更复杂的核。只能由核和已经产生的粒子之间碰撞才能产生可观数量的更复杂的元素。这意味着^{4}氦核和中子、质子和其他^{4}氦核碰撞时可能形

成更复杂的核，然而这种碰撞不能形成原子量为 5 或 8 的更复杂的核，因为不存在这类稳定的核！

由于这些因素，在膨胀开始时元素综合仅限于最轻的元素，在大爆炸之后约 300 秒时结束，那时温度降到低于 10 亿度而粒子的能量太低而不能产生核能，导致形成氦的反应与氢弹爆炸时的情况类似。比氦更重的元素是在我们时代的恒星中合成的。恒星中的物质存在的时间很长，以至于不仅仅是最快的核反应才能发生。比铁更重的元素的合成在剧烈的爆炸过程中出现(在超新星爆发中)。恒星中进行了核合成过程的一部分气体从恒星的表面上通过爆炸被抛射到周围的空间中，构成缓慢的气体流。下几代的恒星以及其他的天体后来就由这种气体形成。

让我们回到宇宙膨胀开始时轻元素的合成问题。因为几乎所有的中子参与了氦原子的创造，可以毫无困难地计算形成了多少氦。在^{4}氦的核中每一个中子和一个质子结合在一起，所以氦的质量占据的份额为中子浓度的 2 倍，也就是 30%。考虑了原始核聚变一些细节后的更精确的计算表明氦的质量份额是 25%。

这样就知道了在大爆炸的大约 5 分钟以后，物质由氦核(25%)和质子亦即氢核(75%)组成。这种化学组成保持不变，直至星系和恒星开始形成并且恒星内部深处发生了核合成。

观测能够支持关于恒星形成以前的物质的化学组成的结论吗？

宇宙中有多少氦

地球上氦非常少,这是由氦元素的特殊性质和地球形成与演化时的环境所造成的。作为一种很轻的惰性气体,氦从地球上逃逸了。然而天文学家发现到处都有氦,尽管不那么容易用通常的谱分析方法来观测。

在炽热的恒星中,在环绕年轻炽热恒星的气体星云中,在称作宇宙线的到达地球的高能粒子流中都发现了氦。在观测到的宇宙范围内最遥远的天体类星体里也检测到了氦。

重要的事实是不管在哪里观测到氦,它几乎总是占据整个质量的25%,其余的是氢。其他元素的混合物非常之少,它们的比例对不同的天体有所不同,但是氦的比例却保持不变。

读者会记得热宇宙模型确实预报在原始物质中氦占据25%。如果大部分氦是在爆炸的前几分钟形成的,而更重的元素要晚得多在恒星中形成,氦的丰度会处处是25%,而其他元素的丰度则有变化,取决于恒星中核聚变时的当地条件和从恒星向其周围空间的抛射。

核反应过程中也会生成氦,但是以这种方式形成的氦占据的比例与宇宙膨胀开始时所产生的氦相比要小得多。

能不能合理地假定观测到的25%的氦丰度能完全用恒星中产生的氦来解释呢?

不,肯定不能接受这种假定。首先,恒星中产生氦时要释放大量能量,使得恒星以极高的亮度发光。如果观测到的氦是恒星中合成的,在当前的宇宙中会观测到它们辐射的高温的光,然而没有观测到这样的光。

进一步的证据来自对最老的恒星的研究，这些恒星肯定是由原始物质组成的。这项研究揭示它们也包含25%的氦。因此，实际上可以说宇宙中所有的氦是在大爆炸前几分钟中合成的。

关于今日宇宙中物质的化学分析提供了证据，说明我们对宇宙开始爆炸的前几分钟里发生的过程的了解和解释是正确的。

30万年的光子等离子体时代以及现代

在前100秒中膨胀着的等离子体里还出现了一类过程。在从奇异状态开始膨胀了10秒之后，宇宙的温度降到几十亿度。在这之前，宇宙包含着许多高能粒子碰撞中产生的电子和正电子。现在碰撞的能量已不足以产生电子—正电子对。电子和正电子发生碰撞并湮灭，转换成为光子。在电子和正电子中包含的全部能量转换成宇宙背景辐射的光子。

几分钟过去了，膨胀在继续，温度还在下降，电子和正电子间的湮灭结束了，物质中的核反应沉寂了。

这就是在早期热宇宙中最后的活动过程。温度变得太低(低于10亿度！)而不足以维持剧烈的反应。

年轻宇宙生命中的激情爆发已经过去，一个漫长而宁静的时代已经来临，它持续了大约30万年。

你要记住整个这段时期中膨胀的等离子体仍然很热而且完全电离化了。它对于宇宙背景辐射是不透明的。背景辐射的质量则大于不透明的等离子体。光和等离子体的混合物经历了微小的振动，这种振动可以称为之“光子声”，因为光压是造成振动的力。

这大约是宁静时代里惟一有意思的事。

这种宁静一直持续到温度下降到4 000度左右的时候。这种温度已足够低而使得电离的等离子体开始转变为中性的气体。这件事看上去似乎不那么重要，但却是宇宙今后演化的转折点。

在这以前，电离的气体对背景辐射来说是完全不透明的。在气体(大多数为氢)变成中性之后，它对宇宙背景辐射的大多数光子来说变成为透明的。在这一时刻，残余辐射与物质相分离。整个宇宙对辐射是透明的，光子通过物质进行传播而不会发生吸收，而物质在膨胀着，变得更为稀薄而冷却。

读者可能会问："为什么这一阶段如此重要呢?"答案是新的天体能够在冷却的中性气体中生成。

光子等离子体的时代为宇宙结构形成的时代所代替。

可以说宇宙历史中的现代是从几乎均匀的原始介质中巨大团块的生长开始的。星系和星系团后来就是由这些团块演化而成的。团块由于引力而结合，整个过程称为"引力不稳定性"。

牛顿曾经深思过在物质粒子的引力作用下均匀物质联合成多个团块的可能性。他写道：

> 如果我们的太阳和行星的物质以及宇宙所有的物质被均匀地散布到全部空间中去，如果每一个粒子都对其他物质有其固有的引力，如果物质散布的全部空间是有限的，那么在空间外围的物质就会由于引力而朝内部的物质下落，最后落向空间的中央而在那里聚集成一个

> 大的球形团块。但如果物质是均匀地在无限的空间里分布，就永远不会聚集成一个团块，而是其中的一些聚成一块，一些聚成另一块，以至于形成了彼此间隔很远的无穷多个大质量团块，散布在无穷的空间之中。可能就这样形成了太阳和恒星。

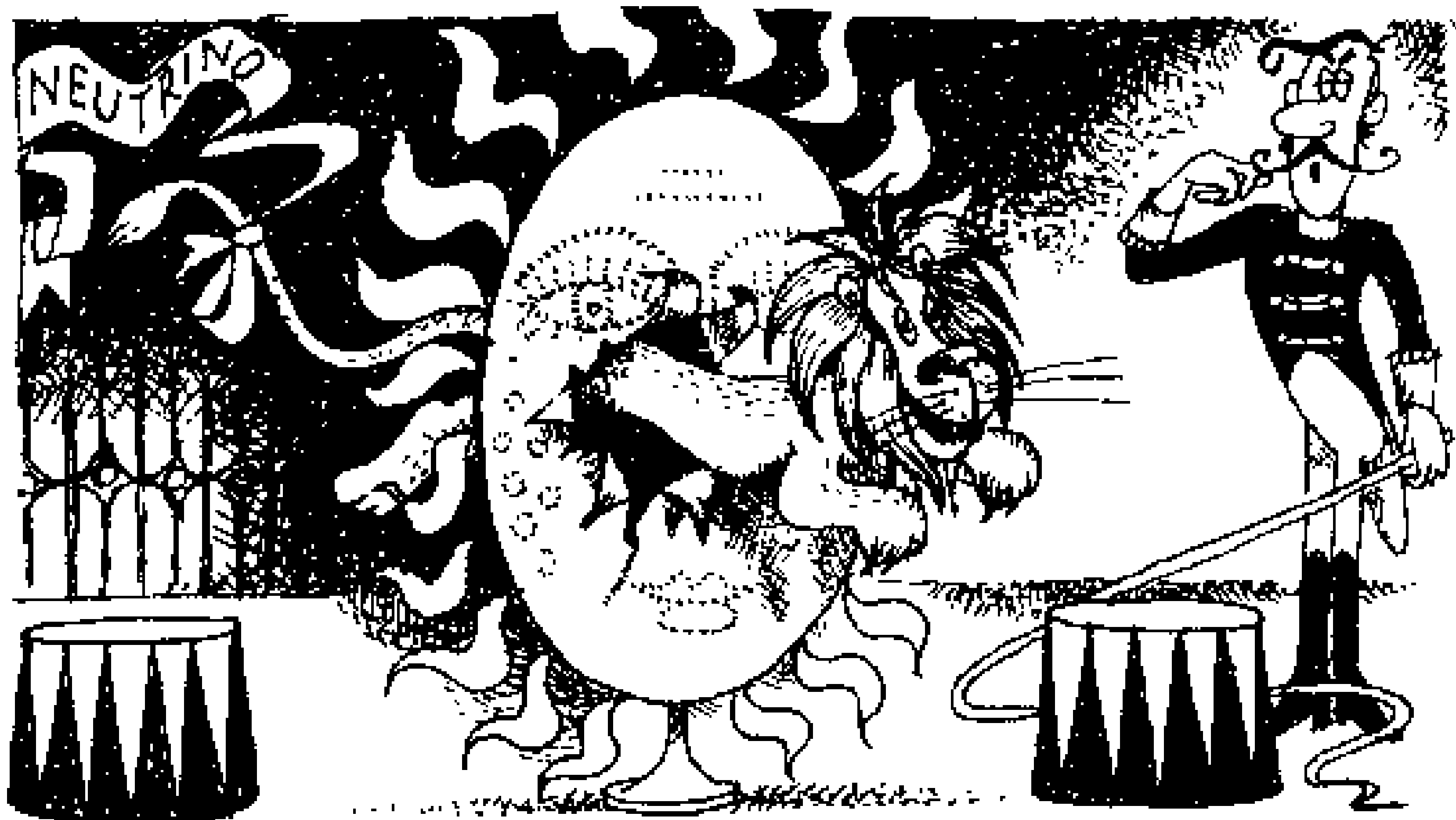
因此，在引力的驱动之下，均匀的物质趋于分离成团块。然而，在早期并没有发生这种分离。事实上，如果这一过程在宇宙诞生时出现的话，后来不会形成星系和恒星。那时的物质极其稠密，组成的团块就会有更高的密度，在宇宙中我们没有观察到这样的团块，几乎完全没有看到。星系的平均密度不高，因此它们是在较近的时候聚集而成的，那时宇宙中在膨胀着的物质已经很稀薄了。引力不稳定性只有在那时才起作用。有样东西在阻挠着引力起作用，那就是宇宙背景辐射的压力。

残余光子的压力是巨大的。如果在等离子体的某个地方有一个密度增加着的团块在形成，按照牛顿的描述，引力肯定趋向于加强团块的形成，然而在不透明的等离子体里传播的光子所产生的强大的反压力作用与引力相反。反压力趋向于瓦解团块，抵消了引力不稳定性的作用。

引力不稳定性只有在热等离子体转变成中性气体后才可能起作用。那时气体对残余光子来说变透明了，光子从团块中毫无阻碍地逸离，在引力收缩过程中形成的气体团块不再遇到来自光子的压力。那时只有气体压力能产生反压力，然而这种压力要比光子的压力弱得多，如果气体团块足够大的

话，气体压力不能与引力相抗衡，引力不稳定性取得了胜利。

在转向讨论引力不稳定性之前，先来考虑研究人员遇到的另一个谜。



4. 中微子宇宙还是"×微子"宇宙

中 微 子

中微子！这种粒子在以前给物理学家带来过惊喜，今后还会带来更多的意外，可是没有人预期过在 1980 年实际发生的事。至少可以说，科学家看到的这幅图像在用尽他们的想像力之后仍然令人难以置信。

让我们按时间顺序娓娓道来。

这一个意外是瑞士物理学家沃尔夫岗·泡利(Wolfgang Pauli)如何在 1930 年发明了这种粒子。"发明"这个词是现代中微子物理的创建者之一勃鲁诺·庞特可伏(Bruno Pontecorvo)在描述中微子的理论预言时使用的。

他回忆着那段时间，写道：

沃·泡利关于中微子的预言表明"直觉"这个词能最恰当地反映科学成就的特点，很难再找到另一个例子了。

首先，50 年以前物理学中只知道两种"初等"粒子，亦即电子和质子，为了更好地了解自然而必须引进新的粒子的想法本身就是革命性的……

其次，中微子这种想象的粒子具有绝对奇异的性质，特别是有极强的穿透能力。

泡利"发明"这种谜一样的粒子是为了要解释原子核的放射衰变中释放出来的一部分能量的行踪，这种放射衰变有电子辐射，称为 β 衰变。

在测量一个放射性元素的 β 衰变的产出物的能量时(例如从氚到氦的衰变)，人们发现衰变后所有记录下来的粒子的全部能量之和在不同的衰变事件中是不同的，明显违反了能量守恒定律，因为总有一部分能量消失了。

即使是尼尔斯·波尔(Niels Bohr)这样的物理界巨匠也开始接受在这类过程中确实违背了能量守恒定律的猜疑。就在这种情况下泡利出来作了"发明"。他假设能量守恒定律仍然成立，但是在仪器记录下来的粒子之外，衰变还产生了一类新的粒子。这些假想的粒子几乎不与普通物质发生作用，因而从实验室飞离而不被检测器所发现。逃逸的粒子带走了那份得不到解释的能量，使得看上去好像能量消失了。这种神秘的粒子被称为中微子。

从那时以后,半个多世纪已经过去了。如我们说过的那样,中微子给物理学家带来许多困惑。已经发现中微子和物质之间的作用不仅是弱,而且是不可思议地弱。它们可以自由地穿越地球、太阳、恒星或是宇宙中任何一个天体,就像宇宙空间是空的,如同光穿越窗玻璃一样。

显然,中微子的这一性质使对这类粒子的检测变得极其困难。一直到1953年至1956年这一期间,通过中微子造成的核的变化才直接地发现了这类粒子。

进一步的分析揭示了至少有三族中微子(在本书的叙述中将不区分中微子和它的反粒子反中微子,而使用一个共同的词"中微子"):电子中微子、μ中微子和τ中微子。每一族都只参与一定的核反应。

在这里将不再全面细说中微子的各种奇妙的性质,只想指出这些不平常的性质是如此神奇,以至于物理学家一方面无助地承认他们不能解释中微子为什么具有这些性质,但在另一方面,物理学家以近于宗教式的信念(他们科学的直觉支持这种看法)预期如此奇妙的粒子在宇宙中一定扮演着一种特殊的角色。以下是20年以前杰出物理学家们说的话。

美国物理学会的前主席约翰·阿尔齐伯德·惠勒(John Archibald Wheeler)指出,那时候的物理学家一点也不知道与电磁作用相比中微子作用为什么如此之弱,而与引力作用相比中微子作用又是如此之强。

值得注意的是惠勒在他的书《中微子、引力和几何》中把这句话列为单独的一章(原文如此)。与此相对照的是这本书的第一章有100多页非常复杂的公式。

为中微子物理的进展作出巨大贡献的马尔科夫写道:

> 一个现代人很难预言中微子在未来的物理学中扮演的角色。然而，这种粒子的性质是如此初等又是如此奇特，以至于从逻辑上就可以相信自然界创造中微子是为了达到一些深奥而我们还不能理解的目标。

以后我们会看到这些目标是什么。

我们就要讨论的最近的发现使得中微子越发引人注目，同时也造成要重新估算三个重要事物的组合，它们是引力、中微子和宇宙。

引力是驾驭物质运动的主要的力，中微子，或是其他一些与中微子类似有与其余物质几乎不起作用的粒子，在宇宙中成为最重要的粒子。这类假想的粒子在现代理论中俯拾即是。虽然它们还没有为实验所检测证实，它们之中的一些看上去存在于现实世界中。这类粒子中有引力微子、光微子和许多物理学家"发明"的其他粒子。我们把它们全叫做"×微子"。在试图认识宇宙是什么的时候，正是这些"×微子"是人们必须首先要进行探索的粒子。

宇宙的性质

前面几章已经向读者介绍了我们周围宏观世界的一些重要性质，这些性质被发现了，随后又得到科学的检验和证实。让我们回忆一下后面的讨论所需要的那些确凿无疑的事实。

首先，宇宙是从一种超密的状态开始膨胀，那时物质是极端的炽热。冷的宇宙微波背景辐射是那个时代的遗迹。也已

经可靠地确认了在几十亿光年的尺度上物质的分布不存在显著的不均匀性。这表明一个甚大尺度的宇宙并不是由个别结构单元所组成的。可以用观测宇宙微波背景来完善地确认这一事实：如果在几十亿光年或更大的尺度上存在不均匀性，从不同方向来的宇宙微波背景辐射到达地球上时会有不同的强度。这是因为高的密度会产生强的引力场，微波背景光子在离开强引力场时会损失掉一些能量，也就是发生了"红移"，因此来自这些方向的辐射一定会有弱一些的强度。然而并没有观测到宇宙背景辐射强度的显著变化，宇宙结构单元的阶梯式金字塔并没有延伸至无穷。换句话说，在从大约 1 亿光年开始的甚大尺度上宇宙是均匀的。应当说明美国卫星 COBE 发现了在天空不同方向上微波背景辐射的强度有非常小的差别。这一发现确认了在甚大尺度上物质分布基本上是均匀的。

还请回忆一下观测揭示了宇宙最大结构单元超星系团的一些重要性质。星系和星系团位于蜂窝状结构中蜂室墙壁的薄层上，而蜂室内部是空的。宇宙中星系的分布可以说类似于蜂巢。在蜂房的壁上星系的密度特别高。

已经非常可靠地确立了关于宇宙的结构和演化的一些重要事实：宇宙的膨胀，它初始的热状态，以及现在的蜂窝状结构。

没有解决的问题

在这些问题中，我们从宇宙结构的起始和生长的机制开始。

宇宙现在的结构是如何形成的？在什么时候形成又为什

么会形成？大的星系团和超星系团这些宇宙的最大结构单元为什么有我们观测到的尺度和形状而不具有另一种样子？在过去的15年里，天体物理理论家们与观测者们一直试图通过合作回答这些问题，但直到最近还不能说星系形成过程的主要阶段已经得到确认和了解。

确实还有一些非常重要的未解之谜。前面几章说过所谓暗物质之谜，从天体物理学家接触这个谜的那时开始，很长时间以来人们就怀疑我们对宇宙的认识还有一个重要的门槛要迈。

你会记得在20世纪70年代开始的时候就已清晰地提出了这个问题。暗物质之谜可陈述如下：根据星系在其星系团中的运动方式，人们必须假定星系之间的空间里有一些不可见的质量，这些质量以其引力影响运动着的物体，除此之外它们一点都不显山露水。非常可能有类似的暗物质围绕着大的星系，这是从围绕大星系的矮星系和其他天体的运动中推断出来的。这种不可见的质量称为暗物质或者隐质量，对它们的性质实际上一无所知。观测表明在星系集中的区域里暗物质的数量是星系中可见物质的20倍。一个典型的星系团中所有星系的可见物质的质量大约是太阳质量的3×10^{13}倍，而隐质量却大约为10^{15}太阳质量。确实有一些专家认为揭示暗物质的观测不那么可靠，一直到80年代初，关于这一问题的争论仍在时冷时热地持续。

宇宙内的中微子

现在让我们回到故事的主角中微子。除了本章开始陈述的那些之外，还要谈一些情况。直到最近，物理学家都没有怀疑过中微子有等于零的静止质量，并且以光速运动。

已经有那么一段时间对涉及中微子的过程及其在天体物理中可能扮演的重要角色进行了细致的研究。

已经确立在浩瀚宇宙内中微子的数量几乎像残余电磁量子(光子)一样地多。上一章里说过,光子和中微子自宇宙膨胀的初始阶段起就一直生存在宇宙中。在宇宙膨胀的初始阶段,热的稠密物质有极高的温度,对光子和中微子都是不透明的,那是存在快速反应把中微子、电子、电磁量子和其他初等粒子相互转换的时代。这些过程允许在现代物理的框架中进行可靠的计算。计算的结果说明在宇宙开始膨胀的几十秒后,单位体积内中微子(包括反中微子)的数量近似地为光子数量的 1/3。

在宇宙以后膨胀的过程中,光子和中微子的数量之比一直保持不变到今天。迄今为止,我们不能用直接的方式检测残余的中微子,因为它们的能量极低:如果中微子的质量是零,它的能量大约是 5×10^{-4}电子伏特(eV)。然而,天体物理学家能够预报它们的丰度。我们提到过每立方厘米中包含500个残余光子,残余中微子的数目大约是其 1/3,也就是每立方厘米大约 150 个粒子。

读者会记得宇宙微波背景中每一个光子有确定的能量,与这一能量对应的质量值大约是 10^{-36}克,可算得宇宙背景辐射的质量密度约为 5×10^{-34}克/立方厘米。这大约是宇宙中普通物质平均密度的二千分之一。

结论是宇宙微波背景辐射的质量密度小得可以忽略。中微子的情况类似:它们的平均质量密度(由这些粒子的能量决定)比电磁辐射的还要低,大约是 1.5×10^{-34}克/立方厘米。因此,宇宙背景中微子在现代宇宙中的作用可以忽略,不

仅是它们的全部质量可以忽略，而且它们实际上不与宇宙中物质的其余部分发生作用。

这就是 1980 年春天以前大多数专家对中微子在今日宇宙中起的作用的看法。

中微子实验

1980 年春天，在苏联科学院理论和实验物理研究所(ITEP)中由柳比莫夫(Lyubumov)和特里塔科夫(Tretyakov)领导的一批物理学家发表了他们多年实验工作的成果，指出电子中微子的质量不是零(请记住为了简单起见，我们只说电子中微子。实际上还有两类中微子：μ 中微子和 τ 中微子)，在实验中测得的电子中微子的质量(它们的"静止质量")大约有 6×10^{-32}克，用能量单位则是 35 电子伏特。这个结果和其他一些事实一起与早年的信念相矛盾。中微子并不以光速运动，而能以低于光速的任何速度运动，包括处于静止的状态。

我要强调测量中微子质量的实验是难以置信地复杂，也要强调实验者并不坚持他们的结果是最终的真实的中微子质量。这个数字要在今后一系列的实验中再三核查。然而，如果这个结果得以证实，其后果非常严重，对天文学来说更是如此。正因为如此，理论工作者并不坐等关于中微子质量结果的最终确认，而是开始分析如果中微子有质量，宇宙的图像会发生什么变化。另一些实际工作者则在最近报告说不仅电子中微子有非零质量，其他族的中微子也是这样。在 20 世纪 90 年代末电子中微子质量的估计值已经比 20 世纪 80 年代初小得多了。

实际上在这些实验之前很久，曾讨论过假定中微子质量

不为零对天体物理可能产生的影响。早在1966年,苏联物理学家葛尔叙坦(Gershtein)和察尔多维奇分析过不可忽略的中微子质量对整个宇宙膨胀的影响。两位匈牙利理论工作者,马克斯(Marx)和斯扎雷(Szalay)也研究过不等于零的中微子质量的假设造成的宇宙学结论。

然而,这些都只是不那么确定的尝试,试图分析各种各样的可能性。在苏联物理学家的实验之后,情况起了巨大的变化。

在实验物理学家结果的推动和刺激之下,理论物理学家才开始向这个课题作真正而有力的冲刺。

中微子宇宙

根据ITEP物理学家得到的数据,中微子比电子轻2万倍,比质子轻4000万倍。为什么理论物理学家期望这种与任何物质都不发生作用的最轻的粒子是宇宙中一个至关紧要的成分呢?

答案十分简单:残余的中微子非常之多。每立方厘米中它们的数目远超过质子的数目,平均超过10亿倍。因此即使每一个中微子的质量极其微小,中微子的总质量构成了宇宙中物质的主要成分。可以毫无困难地算出,如果电子中微子的质量是6×10^{-32}克,它们的平均密度(忽略其他类型的中微子)大约是10^{-29}克/立方厘米,那是中微子以外的全部物质密度的10倍~30倍。结论是中微子的引力是决定今日宇宙规律的主要的力。普通物质的质量及其引力效应只占宇宙中主要质量亦即中微子质量的3%~10%。于是可以说宇宙主要由中微子组成,也就是说我们生活在一个中微子宇宙里。

本章开始时暗示过科学家发现了一幅奇妙的图像就是指这个结论。

上面的结论还有一个推论。

宇宙的膨胀是否永恒，这是宇宙演化中最重要的问题。如我们所知，它的答案取决于宇宙物质的平均密度。如果密度超过了一个临界值，物质的引力会减缓宇宙的膨胀，经过一定时间后宇宙的膨胀会停止，并迫使星系们开始聚拢，宇宙的膨胀会被收缩所取代。如果物质的密度低于这个临界值，引力将不足以使膨胀停止，宇宙将永远膨胀下去。

根据现代数据，如已提到过的那样，临界密度是10^{-29}克/立方厘米。就在不久以前，普遍相信宇宙密度的主要部分来自普通物质，它们的密度近似为 3×10^{-31}克/立方厘米。这一估计意味着密度低于临界值而宇宙是在永恒地膨胀着。现在发现了关于残余电子中微子(不包括其他类型中微子)密度的估算值近似等于临界值 10^{-29}克/立方厘米的有力论据。不应当忘记在残余的电子中微子之外，还有 μ 中微子和 τ 中微子。至今还没有直接测量的实验能测出它们的质量，但是理论和间接测定的实验表明如果电子中微子的质量不是零，其他种类中微子的质量也不太可能是零，而且 μ 和 τ 中微子的质量或许不低于电子中微子的质量。如果这些猜测是正确的，宇宙物质中平均密度会大于临界密度。这说明在十分遥远的未来，几十亿年之后，宇宙的膨胀将会转变成收缩。请注意这一“最强的”推断却来自“最弱的”粒子——中微子。

星系的起源

让我们回过来讨论宇宙结构的起源。在膨胀的初始阶

段，物质是近于均匀膨胀的等离子体。是什么导致了均匀的等离子体分离成团块然后演化成天体和天体系统呢？是什么导致星系团的核形成呢？

大多数专家认为是引力不稳定性：随机而小振幅的密度集中以其引力吸引周围的物质，随密度增加而变得越来越稠密、越来越大。在一定的条件下，物质的团块会增长为很大的团块，以后生成星系团。苏联物理学家利弗席兹早在1946年就奠定了描绘这一过程的理论基础。

现在可以假定中微子的引力是宇宙中最重要的因素。例如，分析在引力不稳定性的作用下物质不均匀性增长时，中微子的引力一定是最重要的因素。

不均匀性增长的一般图像可描述如下。在膨胀开始的最早时刻，空间密度分布只有随机而非常微小的不均匀起伏。我们知道就在1秒钟之后，物质的密度下降使得任意类型的中微子都可以自由地穿越。在这一期间，中微子仍然具有非常高的能量并且以十分接近光的速度运动。显然它们抹平了小的不均匀性，中微子的分布变得更加均匀。然而只有在小的空间尺度范围内才是如此，也就是限于与中微子团块比较要小得多的空间区域里。

中微子从比较小的团块中逃逸并很快和其他的中微子相混合，平均化了也就抹平了不均匀性。时间越往后，就有越大的不均匀性被平均化。这个过程一直持续到中微子开始以比光速小得多的速度运动，那时宇宙的膨胀降低了它们的能量。计算表明，在膨胀开始大约300年之后，中微子的速度大大降低以至于不再能逃离很大的团块。密度原来只刚刚超过平均值的团块因引力而加强，变得越来越稠密和越来越大，直到整

块物质分离成在收缩着的中微子云。

我们能够计算这类中微子云的质量。因为密度的平均化和中微子以近于光的速度运动持续了只有最早的300年，我们的结论是平均化过程发生的区域其大小不会超过300光年。在更大的中微子团块里，在大尺度内有更大的中微子密度，因为中微子没有足够的时间来逃逸。然后中微子运动的速度急剧减小，它们的相互引力使密度增加，这些新的团块构成了中微子云。因此，这些云的质量是由半径为300光年的球内包含的中微子的数量来决定的，时间是宇宙开始膨胀后的300年。

计算表明，这样一块中微子云的典型质量仅仅由基本自然常数来决定。这些常数是普朗克常数h、光速c、引力常数G和中微子质量m。前面三个常数是已知的，如果假定中微子质量真的是35电子伏特亦即6×10^{-32}克，就能算出典型中微子云的质量大约是10^{15}太阳质量。

这就是关于中微子云质量的情况。关于它们的形状又能知道些什么呢？25年以前察尔多维奇得以证明在这种过程中产生的云一定是扁平的，形状类似薄煎饼。许许多多的在空间随机分布的"薄煎饼"的组合构成了不可见的中微子蜂巢。

我们得到的结论是在现在的空间中一定形成了不可见的中微子云的蜂窝结构。这同样适用于其他可能的"×微子"云。但是普通物质怎么样，它们也聚集起来形成一种空间结构吗？

在膨胀开始的时候，普通物质（宇宙中除中微子以外的所有物质）在宇宙中也几乎均匀分布。如我们所知（更恰当些说



是我们有证据可以相信),这些物质的质量远小于中微子的全部质量,并且在宇宙膨胀的初始阶段,它们组成了热等离子体。

在上一章里已讲过在大爆炸之后大约 30 万～100 万年间,普通物质大大地冷却,以至于等离子体转变为中性气体,其压力也大大降低。冷却了的中性气体在中微子云引力场中

变得更为稠密，并且向中心区域凝聚。这些较为稠密的中性气体团块逐渐形成星系团、星系和恒星。因为普通物质的质量是中微子质量的 1/13，一个质量约为 3×10^{13} 太阳质量的星系团形成于一个质量约为 10^{15} 太阳质量的不可见的中微子“薄煎饼”之中。

从关于大星系团的质量和形状的观测，天文学得到的数据肯定表明存在着不可见的粒子(例如“×微子”)云。事实上关于中微子云的假说会引起一些困难，这时“×微子”会对此负责。

现实和科学幻想

中微子聚集成云，在其中以 1000 公里/秒量级的速度运动。中微子的海洋表示早期宇宙研究中忽视了的重要事物，没有它就不能解释宇宙许多重要的性质。

理论天体物理学家说，在把中微子或“×微子”看做有质量的粒子后，许多不可理解的事实在宇宙图像中有了恰当的位置。1980 年苏联天体物理学家多罗斯柯维奇在一段至理名言中说道：“如果发现中微子的质量是零，我们必须去发明另一些几乎不和其他粒子作用的质量不为零的粒子。”我们称这种粒子为“×微子”。

事实上在多罗斯柯维奇半开玩笑的讲话中的“替代品”粒子已经出现在现代物理假说的目录中。例如，可以再次提到光微子，它是类光的粒子却有不为零的质量。又如引力微子，它类似引力子，但却有质量。所以，如果中微子的质量被证明小到可以忽略，以至自然界的质量不由中微子来决定，那么宇宙会由一些更为奇特的成分所组成，譬如光微子、引力微子或

是一些其他的"×微子"。

对这一问题,我们距离真正的答案还很远,我们的陈述中的相当一部分是现代科学前沿还在讨论之中的内容。我在陈述中试图区分已经可靠确立的事实和正在研究讨论的问题。

在1982年夏天,著名的英国物理学家斯蒂芬·霍金邀请科学家们到剑桥参加一个小规模的讨论班,来讨论膨胀开始后第1秒内发生的过程。后面要谈到这些过程。有一天的深夜,在一天紧张而有趣的工作之后,马尔科夫教授和我沿着古老而或许是最著名的世界科学中心的狭窄街道散步。我们的话题突然转到今天我们构思的宇宙图像在什么程度上已经变成如此奇异、多样和美妙。几个世纪以前伟大的牛顿曾经在同一座城镇上进行研究。今日宇宙的图像要比牛顿的球运动的机械图像丰富多了。

我提起马尔科夫教授关于中微子在宇宙中作用的预言(本章开始时曾予以引述),我认为我们这些专家在讨论班中讨论的事比科学幻想小说中的任何事情都奇妙。马尔科夫说不存在什么严肃的科学幻想文学。任何严肃的或者说是真的文学主要关注的是人,关注他们的灵魂。一个作家可以运用来自科学幻想世界的情景创造所谓的科学幻想(可以是好的,也可以是坏的)。但是在科学幻想小说中任何使小说科学化的企图都会使小说成为浅薄的艺术,而且这类文学就不再是幻想小说了,甚至和科学也没有一点类似之处。与此相对照,真正的科学总是充满了幻想!为了掌握科学,特别是为了进一步发展科学,需要有极其丰富的想像力,用它来拨弄在坚实的知识支持下的严谨公式。"做个科学家并不容易,虽然非常有意思",马尔科夫教授说道。

至于科学幻想小说，这位教授不仅是这类文学的一位积极的读者，而且自己也写这类书。回到莫斯科后，我读到了马尔科夫写的一本短篇科学幻想小说。

让我们从幻想回到现实，总结一下在宇宙膨胀生涯第1秒中的经历。我们看到了早期热宇宙中的狂暴过程，目睹了造成许多世界诞生从而产生今日宇宙的剧变。

今天我们生活在结构发展完好具有多层次天体系统的宇宙中。在恒星中仍然发生着把氢转换成氦和更重元素的反应。核燃料的蕴藏极其丰富，足够使反应进行几百亿年。下一步是什么？恒星不可能是宇宙永恒的成员，它们将燃烧殆尽而死亡。一位杰出的宇宙学家勒梅特(Lemaitre)写道："宇宙的演化就像刚刚结束的烟火表演：极少量的红色残火，还有灰烬和烟雾。站在冷却了的余烬上，我们看到恒星们在渐渐暗弱，徒劳地去回忆世界起源时已经逝去的灿烂。"

难道宇宙的未来就像大火之后冒烟的废墟吗？

肯定不像！在本书的后面将讨论宇宙的未来，但先要再次走近宇宙开始膨胀时的奇点。这次要离奇点更近一些，要加上科学的想像力(不是科学幻想！)，就是马尔科夫教授强调的那种想像力。



5．认识的前沿

宇宙为什么是这样

在非常接近奇点的地方，在温度比 10^{13}K 高得多的地方，宇宙中在发生些什么？前面几章里没有讨论这种情况。

我们已经熟悉了用来探索宇宙刚刚开始膨胀时出现的过程的方法。例如，去寻找这些过程留下的踪迹。我们已经提到过在大爆炸前几秒中发生的过程的一个明显的痕迹是组成恒星的物质的化学组成：在那遥远时代中聚变而成的25％的氦。如果可能的话，现在我们想探寻更“古老”的过程中类似的“明显”踪迹。

已经确立的宇宙基本性质正是所要探寻的踪迹。让我们把这些性质一一列出，然后设法找出对此负责的过程。我们

将讨论现代科学如何希望解释宇宙这些神秘的性质。

第一个谜一样的性质是比重粒子数目多得多的宇宙背景辐射光子的巨大数量。读者会记得这个比例是 10 亿比 1。是什么造成了两者数目如此巨大的差别?

第二个谜是为什么宇宙在大尺度上是如此均匀?如我们所知,观测来自外部空间的宇宙微波背景,测出强度与方向无关,就可以确认这种均匀性。美国卫星 COBE 发现只有非常小的强度差,以后又为其他观测所证实。这说明在等离子体转变成中性气体因而变得透明的时刻,在我们现在观测到的残余光子当初辐射的时刻,空间中相距遥远的点有几乎相同的温度。在那早期阶段,每一个空间点都位于另一些点的视界之外,因此这些点之间没有因果联系,它们之间不能交换信号。如果一个点甚至无法知悉另一些点的温度是什么,它们的温度怎么会相同呢?这就是著名的"视界疑难"。

第三个谜是在大爆炸发生的 100 亿~200 亿年后的今天,宇宙物质的密度为什么非常接近于临界值,而空间的几何性质又为什么非常接近平坦空间的性质?注意,如果在某一时刻物质密度与临界密度值有偏离,差别应随时间而增加。确实如此,如果密度等于临界值,膨胀的速率准确地为引力所平衡。如果微微地破坏了平衡,例如引力占了优势,在一段时间之后减慢了的膨胀会进一步破坏平衡。因此,如果现在物质的密度与临界值的差别在一个量级以内,昔日引力和膨胀速率之间的平衡必须以一种不可思议的精度来调整。可以算出在膨胀开始后的 1 秒,违反平衡的程度不能超过百分之一的十亿亿分之一。是什么因素造成这样高精度的平衡?

还有一个谜是尽管在很大的尺度上宇宙是均匀的,过去

确实出现过小尺度上偏离均匀分布。是什么造成了后来演化成为星系和星系系统的小的原始密度起伏？这是关于原始密度起伏的问题，并不就是随随便便的波动，而是那些在离现在并不十分遥远的年代中导致一个个世界形成的波动。

解决这些问题的钥匙是初等粒子物理的进展。

让我们看看如何用这把钥匙打开自然界最深部的秘密之库。

有四种类型的物理作用：强(核)作用、电磁作用、弱作用和引力作用。按照现代的概念，这些类型的相互作用只有在比较低的能量时才表现为不同的作用，在高能量时并合成为同一种作用。因此在能量为 100 千兆电子伏特(GeV)量级，对应的温度是 10^{15}K 时，电磁作用和弱作用合而为一。在能量为 10^{14}GeV左右，对应的温度在 10^{27}K 时，发生了强、弱和电磁作用的所谓大统一。最后，在能量大约为 10^{19}GeV 或温度约为 10^{32}K时，预期引力作用和其他三种作用合流(“超统一”)。

让我们先搁置引力和其他力最后统一的可能性，而是来审视“大统一理论”的宇宙学结论。

先从上面列出的第一个问题开始。读者可能会对把这个问题称作谜有点不解。每一个重粒子就有 10 亿个残余光子，这个现象中的困惑在哪里呢？

如果回到过去，在温度为 10^{13}K 的时代里，这种现象的奇异之处就变得明显了。那时，如我们已知道的那样，巨大数量的粒子反粒子对不断地产生又立即湮灭。在这些粒子中有电子和正电子、质子和反质子、中微子和反中微子。每种粒子的数目在那时都近似地等于残余光子的数目。在前面提到过的“沸腾汽锅”内包含着数量大致相等的各种粒子及其反粒子。

如果在每一族内重粒子及其反粒子(称为重子)的数目准确相等,在膨胀阶段它们会全部湮灭而转换成光子和中微子,在宇宙中除了辐射和中微子背景外什么都不会留下!不会再有形成恒星、行星以后又演化出人类的物质。

然而,出于某种理由,粒子和反粒子的数目并不准确相等,虽然这一差别非常之小。每10亿对粒子反粒子只多出1个重粒子。随着温度降低,10亿对都湮灭了,但那个"额外"的粒子却得以存活。围绕着我们的今日的世界——恒星、行星和气体的世界——就由这些残留的粒子形成。

这里再次遇到了多少有点奇怪的情况:10亿对粒子和一个额外粒子。它来自哪里又为什么每10亿对就有这样一个粒子?

这是一个头等重要的问题。一直到最近,人们都认为如果在一开始的时候不存在一个"额外的"粒子,在任何反应中都无法产生这个粒子。这一看法就是"重子数"必然守恒(重子数指重粒子及其反粒子数目之差)。在20世纪60年代温伯格和萨哈罗夫(Sakharov)曾指出过违反这一信条是可能的。以后大统一理论证明了一些反应确实违反重子数守恒定律。这些反应涉及超重粒子:所谓超重的希格斯(Higgs)粒子和规范粒子。这些粒子只能在很高的能量下产生,因此使重子数不守恒的反应也只能在这类高能量下发生。这里我们只描述宇宙中产生粒子多于反粒子的一种可能的机制,这也是在历史上第一个被提出来的机制。为了简化陈述和强调主要的思想,我们说一下一种超重粒子,即超重X玻色子。用能量的单位,这个粒子的质量等于大统一的能量10^{14}千兆电子伏特(10^{14}倍质子质量),也就是说在对应温度为10^{27}K的

能量能够产生 X 玻色子。宇宙在大爆炸之后 10^{-34}秒冷却到这一温度。在此温度或更高温度时,不保持重子数的反应与所有其他反应一样的频繁。

另一个重要的因素是粒子和反粒子间缺乏对称性。这表明超重粒子的反应率一般可能微微不同于反粒子的反应率。

现在能够来解释在膨胀的热宇宙中每 10 亿个粒子反粒子对怎样多出一个重粒子了。

在温度高于 10^{27}K 时,宇宙是所有的基本粒子及数目精确相同的反粒子组成的极热的混合物,它处于热动平稳之中,粒子的数目并不更多一些。如果粒子和反粒子的性质没有差别,如果没有违反重子数守恒的反应、所有的重粒子及其反粒子在宇宙膨胀和冷却的过程中会全部湮灭(两者的数目准确相等),到了我们的时代宇宙中就不会有质子和中子,它们全都转换成了光子,今日的宇宙就不会有普通物质。

实际情况是出现了下面的过程。当温度低于 10^{27}K 时,涉及 X 玻色子和反 X 玻色子的反应的节奏变得比宇宙膨胀的速度要慢。这些粒子不再湮灭或衰变,它们的凝聚暂时保持了下来,只是在足够长的时间以后它们才开始衰变。这一过程是以下发生的事的关键。

X 玻色子和它的反粒子反 X 玻色子都以一种违反重子数守恒的方式衰变,重要的事实是 X 粒子不像反 X 粒子衰变得那么多。计算表明产生的粒子要比反粒子略多一些。迄今为此,这些计算并不是十分准确,但已表明大约是每 10 亿对粒子反粒子会多出一个粒子。随着宇宙的膨胀,粒子和反粒子湮灭而最后转换成光子,这些光子和已经存在的光子一起组成了宇宙背景辐射(众所周知,宇宙还有一个中微子背景),

然而多出来的重粒子一直生存下去，它们组成了今日宇宙的普通物质。这样，光子的数目大约是粒子数目的 10 亿倍。

这样就解决了第一个问题。

现在来看另外三个问题。根据大统一理论，在 10^{27}K 或更高温度时，宇宙包含一个场(称为标量场)，这个场具有在第二章“真空中的引力”这一节中讨论过的那种真空所具有的性质。特别是这个场有巨大的“负压力”，或者说是场本身的能量密度决定的张力。这个场也称为“假真空”。以下只陈述关于宇宙膨胀开始时最简单的假设中的一个，也就是说一下最重要的概念。“假真空”与真的真空不同，特别是假真空有非常高的能量密度：大约 10^{74} 克/立方厘米。我们知道真空密度与爱因斯坦引力场方程中的宇宙学常数相对应。在那时，这个常数(类似于“假真空”，可以称之为“假常数”)也很大。

在大爆炸之后的 10^{-34} 秒以内，宇宙的温度大于 10^{27}K。“假真空”的密度是 10^{74}克/立方厘米，而普通物质的热的实粒子和反粒子的密度要更大。结果是“假真空”的引力性质没有表现出来，宇宙按普通的规律膨胀。随着膨胀的继续，普通物质的密度减小，到了 10^{-34}秒变得等于“假真空”的密度。在“真空中的引力”那一节中已经说过真空的引力不一般，它的引力产生斥力。这是在 10^{-34}秒时发生的事。真空产生的斥力造成宇宙的加速膨胀。“假真空”的密度是常数，不会随时间而减少，造成宇宙膨胀的加速度也是常数。膨胀的速度(介质中任意两个元素相互退行的速度)不断地增长(如果真空的引力没有叠加到普通物质的引力上，它会随时间减少)，以至于宇宙中所有的距离大大地增加，达到天文学距离。这个加速膨胀的阶段称之为“暴涨宇宙”。在 10^{-34}秒～10^{-32}秒的期

间内宇宙中所有的距离增加了 10^{50} 倍！

“暴涨宇宙”的状态是不稳定的。在这个阶段普通物质的温度和密度急剧减小，宇宙变得十分冷却。普通物质的密度降到了与“假真空”的密度相比可以完全忽略的程度。不稳定性意味着相变成为可能。相变是从高密度的“假真空”状态变成这样一种状态：“假真空”的全部质量密度（及其对应的能量密度）变换成为普通热物质的质量密度，而真的真空的质量密度是零或者小得近于零。这时“假真空”包含的能量产生了大量的普通物质粒子和反粒子，全都有很高的能量。宇宙再次热到约为 10^{27} 度的高温。

我们不来讨论这个相变的细节。在膨胀开始之后的 10^{-32} 秒，宇宙再次变热。在 10^{-34} 和 10^{-32} 秒的短时间内因“假真空”的斥力，宇宙以巨大的加速度暴涨。没有暴涨阶段，宇宙在这段时间内只会膨胀 10 倍，而暴涨使它涨大了 10^{50} 倍！在这之后，膨胀又开始服从读者已经熟悉的热宇宙演化规律。

本书早些时候谈到的氦合成等过程要比暴涨宇宙阶段晚得多才发生。氦合成发生在 1 秒～300 秒时间段，而暴涨阶段是 10^{-34} 秒～10^{-32} 秒。

暴涨宇宙的理论看来正确地描绘了宇宙甚早期的演化。具体的图像和许多细节还有待研究。

暴涨宇宙阶段立即解决了本节开始处列出的第二个问题：视界疑难。让我们在暴涨之前，选择非常靠近的两个点，它们位于所选时刻的共同的视界之内。它们之间可以发生信号交换，经历温度平衡等过程。在暴涨时它们之间的距离变得非常之大。到了我们现今的时代，如果不考虑暴涨阶段，这些点之间的距离就会比视界更大。因此，在暴涨之后不能交

换信息的点在暴涨之前完全有可能进行信息交换。

暴涨阶段结束时从“假真空”密度到普通物质密度的变迁解决了第三个疑难。“假真空”的“反引力”使得从真空中产生的普通物质以一种“平衡的”速度膨胀。可以说真空的密度准确地对应那时的临界密度，以至于相变之后的物质密度明显应当以极高的精度等于临界值。

现在来说第四个疑难，亦即在暴涨阶段结束后介质中应当存在的小的原始密度波动是怎么来的。物质的量子特性本身就会使一些物理过程的结果产生不均匀性。这些过程总是产生小的不均匀性。物质在衰变时，一部分衰变得略快些，而另一部分略慢些。在一些地方，“假真空”的量子衰变会比另一些地方出现得早一些，造成所生成的热物质膨胀的相变在不同地点发生的时间略有不同，产生了密度微小的不均匀。这个过程就是原始的声振动，后来在长时间演化之后导致了星系的形成。

这就是暴涨宇宙的理论怎么解释了我们周围世界的主要性质。

事实上，这个理论给出许多其他十分有趣的预言。

我们说到过“假真空”的消失可以和相变相比较。

一些相变现象为人所熟知，例如液体凝聚成为固体的过程，液体转换成固态的结晶状态。在液体结晶时，很多轴有不同定向的晶体在液体的不同点形成结晶的核心，在固体化的液体中形成很多互相接邻的不同区域。

对早期宇宙中发生过程进行分析的最新成果表明，暴涨的宇宙在进行相变时以一种类似的方式形成具不同性质的相邻区域，在区域的边界上会出现各种奇特的粒子和结构。例

如，那里会产生所谓的磁单极。这些粒子载有孤立的磁荷，就像电子或质子是孤立电荷的载体。与电子和质子不同，磁单极是超重粒子，有 $10^{16}\sim10^{17}$ 质子质量！这样的粒子不可能在现代的宇宙中产生，因为没有这么高的能量源。迄今为止还没有发现磁单极，预期在区域的边界上磁单极数量很多。现在让我们来看在膨胀宇宙中一个区域诞生后的演化过程。

在膨胀开始后 10^{-34} 秒时区域形成。每个区域的大小大约是 1 光秒的 10^{-34}，亦即大约是 10^{-24} 厘米。在宇宙以后的暴涨阶段中，区域要涨大 10^{50} 倍，变成 10^{26} 厘米（请注意这已经是 1 000 万光年）。

暴涨阶段在 10^{-32} 秒后结束。在这以后，宇宙以更熟悉的规律膨胀，为普通的引力所减速。到了我们现今的时代，距离又增长了 10^{25} 倍，区域的大小近似地为 10^{51} 厘米。这个尺寸实在巨大，大约为 10^{33} 光年。读者可能记得宇宙可观测的部分的直径只有 10^{10} 光年！在暴涨阶段之后，宇宙中辐射来的信号没有一个来自比 10^{10} 光年更远的地方，这个距离就是早些时候引入的视界。

因此，如果在遥远过去的宇宙确实存在相变产生的区域，它们会是极其之大。我们生活在一个这样的区域内，在它的内部。分离我们的区域和其他区域之间的墙可能在 10^{33} 光年那么远的地方。在区域内部，在大尺度上物质的分布是均匀的。磁单极和其他类型的奇特物质黏着于分离不同世界的"篱笆"上。

我们现在看到的世界难道不是一个最有趣和最奇妙的地方吗？

我们的宇宙在很大的尺度上是如此均匀，超出了视界之

后又会变得不均匀！前面说的宇宙只不过是我们的区域。

在这个时候来看看天文学的历史中发生的事件是合乎逻辑的。在不同时代创立的世界系统都宣称自己描述了整个世界和整个宇宙。事实上它们都只是一个特殊天体系统的模型。亚里士多德(Aristotle)和托勒密(Ptolemy)的系统正确地反映了地球作为一个天体的性质：它的球形、月亮围绕地球的运动。这个系统的其余部分是错误的。哥白尼(Copernicus)的系统是太阳系的一个模型。赫歇耳(Herschel)的宇宙是银河系的一个模型。很可能星系团世界的性质只适用于我们的区域。

围绕着我们的物质的性质无穷又无尽，试图了解这些性质的人类大脑的力量同样也没有极限。

本节中谈的这些在前面提到的剑桥讨论班里都讨论过。我要再次强调它们全都处于发展中的现代科学的前沿。在未来将会弄清很多事，但也会有很多仍然是未解之谜。

例如，并不清楚离奇点再近些发生些什么。在奇点之后小于 10^{-45}秒的时间段内，可以确定时间和空间都以离散的量子状态存在，然而我们只能猜测发生了些什么、如何发生和为什么会发生。

在膨胀开始以前存在些什么？至今没有什么可靠的结论，只能引述一些可爱的假说。这些假说还不能说是科学。在一本书中人们可以不受严肃科学的约束而乘着幻想之翼任意翱翔，然而那就是和这本书的风格完全不同的另一本书了。

乘着时间的翅膀

在一个有创造性的物理学家特别是理论物理学家的生涯

中，常常会有这样的时候，物理学家觉得所研究的领域里再也没有有意思的问题了。认识著名理论物理学家列夫·朗道的人回忆年轻的朗道抱怨说：所有值得注意的问题都已经解决了，在残羹剩饭中很难再找到值得研究的问题，就像那些漂亮姑娘，不是订了婚就是已经出嫁。当然，朗道自己的行动证明了这个幽默的说法是错误的，他解决了许多重要的问题。漂亮姑娘结了婚而为更年轻甚至更漂亮的姑娘所取代。同样，已经解决的问题为新的，甚至更为奇妙的问题所取代。

我记得自己生活中这样一段不愉快的时期，当时我觉得自己正在从事的课题没什么意思。在一次和一位同事的谈话中我说到了这种感受，这位同事是一位年轻漂亮的女士。谈话后来转到了一些天体的未来。我的同事建议在遥远未来宇宙的特殊条件下计算中子星的冷却过程。在本书余下的篇幅里我就是要说一说一些科学家合作进行的对宇宙遥远未来情况的分析。

研究过去是为了更好地了解现在和未来，而人类不远和遥远的未来，智能生命的未来很大程度上依赖于自然界的未来，地球、太阳、银河系和宇宙的未来。

关于宇宙未来的研究原则上不同于对它过去的研究。过去留下了踪迹，一旦发现了这些踪迹就可以用来检验我们的看法。未来的图像只是一种现在的延伸，没有证明的可能性。然而我们当前的物理和天文学知识的基础十分坚实，可以非常确定地去讨论宇宙遥远的未来。

未来首先取决于膨胀是否要永恒地持续下去。先来考虑一个永远膨胀的均匀宇宙的未来，它的密度不超过临界密度。在这个永恒膨胀的宇宙中会发生什么样的物理过程呢？

有一个过程是没有人怀疑的：恒星将烧完自己的燃料。在几十亿年后太阳将结束自己的活跃时期，转变为地球大小的白矮星，逐渐地冷却。

质量比太阳更大的恒星寿命更短，按照质量的大小它们将转变成几十公里大小的中子星或是黑洞。

恒星也可能有灾难性的终结，在一场爆发中完全毁灭。超新星就是以这种方式爆发的恒星。

现在，新的恒星不断地从恒星际介质中诞生。然而有那么一天会来临，储存的物质和核能都已用尽，新的恒星不再诞生，老的恒星变成冷的天体或者黑洞。

宇宙演化的恒星阶段将在大约 10^{14}年的时间内完成。这是一段非常长的时间，是大爆炸至今时间的 1 万倍。

现在来看星系的命运。

星系由几千亿颗恒星组成。一般认为星系中心有超级黑洞，天体物理学家从星系核的剧烈活动中了解这一点。有的时候，星系中的恒星会在其他恒星的引力作用下获得很高的速度而变成一个星系际流浪者。这样的事件在现代很稀有，对星系的未来却很重要。恒星将逐渐地离开星系，星系的中心部分一点点收缩成为非常致密的星团。这样一个星团中的恒星将相互碰撞而转化成气体，这些气体将落入中心的超级黑洞中去，从而使它的质量增加。恒星在离黑洞太近时要被潮汐力所毁灭。

最后阶段是一个超级黑洞吸收了星系中心区域恒星的残余，而星系外部 90% 的恒星被散射到星系际空间里去。星系衰变的过程大约要 10^{19}年，那时所有的恒星已经死亡，实际上已是不再有辐射的恒星。

未来物理过程中的决定性因素是核物质的不稳定性。例如，质子是一个寿命极长的粒子但也是一个不稳定的粒子。预报宇宙在开始膨胀后 10^{-34}秒～10^{-32}秒期间发生暴涨的大统一理论也预言质子一定会衰变(在核里的中子过去认为是稳定的，现在也被预言为不稳定的)。质子的平均寿命估计近似为 10^{32}年。质子衰变的最终产物是一个正电子、一个光子、一个中微子，以及可能一对或数对电子—正电子。虽然至今还没有成功地发现质子衰变的证据，很少有物理学家怀疑有朝一日会拿到证据。

因此，在大约 10^{32}年内核物质会完全衰变，即使是冷的恒星也消失了。事实上，在这之前，核物质的衰变对宇宙的演化已十分重要。核子(质中和中子的统称)衰变中产生的正电子在碰撞中及电子湮灭过程中产生光子，这些光子和核子衰变中产生的光子一起将物质加热。只有中微子能自由地从恒星中逸离，带走了整个衰变能量的大约 30%。

衰变在一个低水平上维持住了死亡恒星和行星的温度，这一温度比绝对零度还是高得多。在 10^{17}年后白矮星冷到 5K 温度，然后保持着这个温度，只要能量从其中心的核子衰变中释放出来。在 10^{19}年后，中子星冷却到大约 100K，之后核子衰变维持这个温度。

在 10^{32}年后，核物质完全衰变了，恒星和行星将转变成光子和中微子。

散布到空间中的气体的命运有些不同(在星系死亡之后留下的气体约占整个宇宙物质数量的 1%)。气体的核物质也肯定要在 10^{32}年内衰变。然而衰变中产生的正电子没有机会和电子发生湮灭，因为气体极其稀薄而碰撞几乎是不可能

的。结果是稀薄的电子—正电子等离子体。

在 10^{32}年时,宇宙还包含大质量恒星死亡后的黑洞和星系中心区域形成的超级黑洞(后面要说它们的命运)。

在核物质完全衰变之后,宇宙中还会发生什么呢?

在那十分遥远的未来,宇宙有光子、中微子、电子—正电子等离子体和黑洞。物质的重要部分是光子和中微子。普通物质衰变成为这两种物质。那个时代是辐射为主的时代,然而应当记住,那是大大冷却了的辐射。

随着宇宙的膨胀,因为粒子的数密度和每一个量子的能量(从而它的质量)在减少,辐射的质量密度快速减小。与此相对照,由电子—正电子等离子体和黑洞表示的普通物质密度的减小仅仅是由宇宙膨胀使物质密集程度减少而造成的,这些类型物质密度减少得要比辐射物质慢。因此,在 10^{33}年后,物质密度大部分是由陷在黑洞里的质量决定的。黑洞的质量远远大于电子—正电子等离子体的质量。如果中微子的质量不是零,整个质量的相当一部分是中微子的质量。辐射为主的时代被黑洞的时代所取代。

然而,黑洞也不是永恒的。如我们所知,在接近黑洞的引力场中有粒子创生。我们也知道恒星黑洞和超级黑洞有量子辐射。这个过程减小黑洞的质量,使黑洞转变为光子、中微子和引力子。一个具 10 个太阳质量的黑洞在 10^{69}年内挥发殆尽,而一个具 10 亿倍质量的超级黑洞则需要 10^{96}年。然而所有的黑洞都要转换成辐射,再一次出现一个辐射为主的时代。这个辐射要比物质衰变的辐射冷得多。如前面说过的那样,膨胀宇宙的辐射密度要比电子—正电子等离子体的密度减少得快,以至于在大约 10^{100}年时,等离子体是宇宙中的主要物

质，实际上也是惟一的事物。

初看起来，宇宙在未来的演化模式十分凄凉，只是渐渐地衰变、退化和离散。

在 10^{100}的年龄，除了以极低的密度散布在空间的电子和正电子外，宇宙几乎什么也没有了。那时每个粒子所占的体积是我们现在看到的整个宇宙体积的 10^{185}倍。难道这表示所有的物理过程将死寂，物质的各种物理形式的活动变成不可能，复杂的系统不会再形成，更不用说那些会演化出生命的系统了？

这个结论是不正确的。从现在观点来看，未来所有的物理过程肯定会非常慢，而且空间尺度也和现在看到的十分不同。你可能还记得宇宙开始膨胀的时候温度超过 10^{27}K，在 10^{-34}秒的时间尺度和 10^{-24}厘米的空间尺度上发生着剧烈的物理过程并创造出物质。与这样的尺度和这样快速的过程相比较，今天宇宙中发生的事件，包括生物学过程，是出奇地慢并且遍及极大的空间范围。著名的美国物理学家弗利曼·戴生（Freeman Dyson）相信在任何情况下，不管在多么遥远的未来，物质运动的复杂形式永远是可能的，甚至可以期望有以很不一般形式出现的智能生命，以至于“生命的脉搏会越来越慢，但永远不会停止”。

浩瀚的宇宙中星星在寂灭，
夜色浓重，
从一个婴儿纤细的手掌中
发出了微弱的脉动，
一阵凄冷幽咽的风孤独地

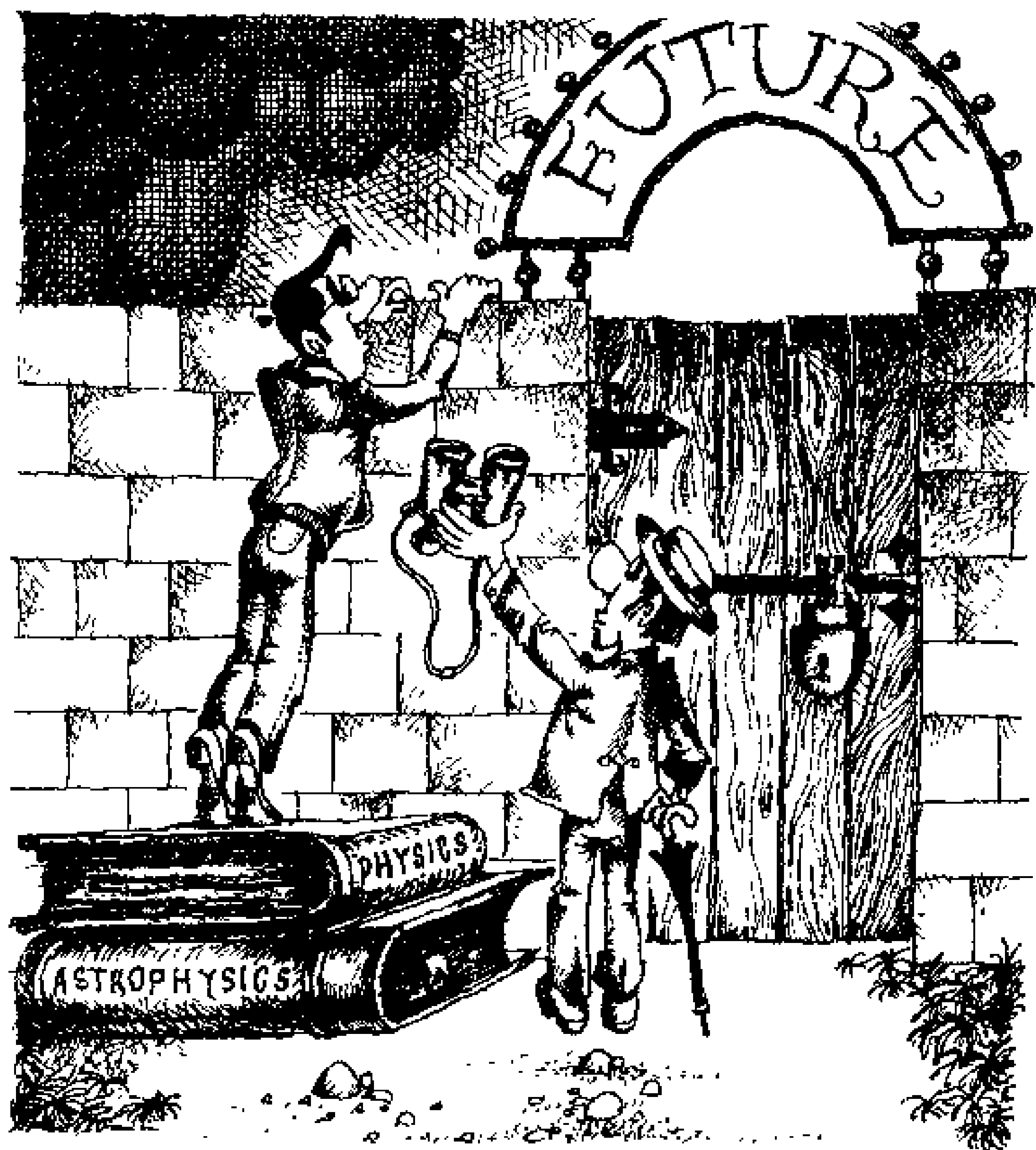
震颤着整个天空，
他开始懂得了他自己，
这个世界，星星，世纪，
出生，生活和死亡，
生命的终结，
宇宙的广袤。
没有人会来计数
宇宙的脉搏——
无底深渊中那些光的碎片。
夜色浓重，
孩子在沉睡，
星系和人类在诞生，
星星在形成，发光和凋谢，
他紧裹在
从远处死亡的恒星中
抽出的光织成的颤动着的网里，
沉沉地睡眠。
人在死亡之后还有什么呢？
这个脉搏，
那双童稚的眼睛——
冰冷黑暗中的闪烁。

我们的想像力在极其遥远未来的景色中漫游。这类旅行很可能会遇到一些无法预测的情况。迄今为止我们用可靠的物理定律讨论了那时的物理过程,但在未来的宇宙中可能会出现实验室中无法实现的物理条件(诸如超低的温度和密度),以至于自然界或许会为我们完全不了解的力和过程所统治。这些力和过程可能急剧改变未来宇宙的图像。

这些可能的过程之一是真空的衰变,包括在膨胀宇宙中向物质的转变。叫做"假真空"的那个真空在前面提到的10^{-34}秒时衰变,产生了高能的粒子和反粒子。这个能量值对应10^{27}K的温度值,物质密度是10^{74}克/立方厘米。

现在的真空也可能有一定的能量密度。在"真空中的引力"那一节中,说到它的密度要么是零,要么很低,不会超过10^{-28}克/立方厘米。在天文观测中很难发现这个密度。理论并没有排除有朝一日真空的质量密度可能转换成实的粒子和反粒子而产生新的物理过程。在转换中产生的物质肯定密度低但却比那时散布在浩瀚的膨胀宇宙中的"我们的物质"密得多。真空的相变对宇宙的命运极其重要。原则上这种相变可以阻止宇宙的膨胀,转而使它收缩。这样产生的"超真的真空"会具有吸引的引力性质,而"假真空"则有排斥的引力性质。显然,从膨胀到收缩的转换将彻底改变早些时候陈述的宇宙的未来。

我还要说明一点,在描述宇宙未来的时候,我假定任何种类的中微子的质量是零,亦即它们就像是辐射,也假定它们像光子,一样有为零的"静止且质量",仅仅因为总是以光速运动才有质量。然而在"中微子宇宙还是'×'微子宇宙"那一章中说到中微子的静止质量有可能不为零。



这一修正以两种方式影响了宇宙的命运。如果中微子的质量非常小,例如小于电子质量的十万分之一,宇宙里中微子产生的引力将非常弱,对宇宙膨胀的速率没有影响。然而中微子的质量密度在遥远的未来不会像光子的能量密度那样减少得很快,而是类似于普通物质,以至于电子—正电子等离子体中永远有一些非零质量的中微子以及反中微子的添加物。

然而，如果发现中微子的质量接近于预报的上限（近似为电子质量的0.000 05），宇宙中微子的全部质量很大，平均密度会超过临界值（10^{-29}克/立方厘米），以至于中微子的引力将在某一时候使宇宙的膨胀停止。这件事可以比核物质的完全衰变更早发生，甚至在全部恒星死亡之前发生。这时宇宙的未来面临着收缩和天体的毁灭，经过十分剧烈的过程重新创生超稠密、超热的物质。

你们看到了无论宇宙演化的图像是什么样的，它的未来总是极端的有趣和多变。

遥远未来的宇宙确实完全不同于今日的宇宙，在所有的版本中都是如此，要么是非常冷而稀疏，要么是非常热而稠密。

这就是真相，人们对此应当有清晰的了解。宇宙的演化是连续的，它的过去十分特别，与现在完全不同，它的未来同样也与现在看到的完全两样。我们也必须清醒地认识到宇宙的未来并不意味着智能生命无法逃脱可怕的命运。人类的大脑已经洞察了自然界的许多秘密并且使自然定律为人类的目的服务。

如果我们的行为表现良好，不让地球上的生命在这个社会动荡的时代趋于灭亡，很难预言人类在100年、1 000年、100万年甚至2亿年内发展的科学智慧能达到什么样的高度。人类有望学会怎样运用宇宙的演化定律去为人类文明服务，学会怎样去控制这些定律，去相信宇宙会在任何时候都为人类的存在准备好“温室”条件未免有点无知。“我们不应当去乞求自然的恩惠，我们的任务是自己去创造良好的环境。”这是一个著名自然学家说的值得人类骄傲的话。当然，当这

项工作变成日常的制度时，环境保护和许多其他的问题都要求有新的处理方式。毫无疑问，未来的社会会找到处理这些问题的办法。

在为本书写上句号之前，我们必须提醒自己，宇宙任何显著的变化（与它现在的状态比）都要在很长的时间后才会出现，无论从日常时间或是天文时间的标准看都会很长，至少是上百亿年或是上万亿年，远远长于宇宙从膨胀开始到现在的年龄，那是在100亿～200亿年之间。

结　　论

关于本书所讨论的问题的故事不可能有什么结论。一个永远在演化、永远年轻的宇宙的故事拒绝给它加上一个结尾。我们要特别强调的观点是宇宙学这门研究宇宙的科学在飞快发展，不断有新的惊人的发现和新的基本理论。新一代的年轻科学家正在着手研究宇宙学中尚未解决的问题。我希望看到他们在这一领域中不仅有知识，也有灵感和热忱。

［Ｇｅｎｅｒａｌ　Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝剑桥文丛　黑洞和宇宙
作者＝
页数＝２０５
ＳＳ号＝０
出版日期＝
Ｖｓｓ号＝７３９４５５２９

附录页